INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Julio 2022 · nº 550 · 6,50 €
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA CLAVE DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Nuevas técnicas buscan subsanar rápidamente los errores

ANTROPOLOGÍA
Tribus amazónicas adalides de la sostenibilidad

BIOLOGÍA CELULAR
Un nuevo enfoque para estudiar los tejidos

MEDIOAMBIENTE
La carrera por el reciclaje del CO_2

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

FOTOGRAFÍA DE PORTADA: IBM RESEARCH

APUNTES



Mientras circulan por las calles de una ciudad, los vehículos conectados a Internet pueden medir las islas de calor urbanas.

EZRA BAILEY/GETTY IMAGES

MAPAS DEL CALOR URBANO

Los coches particulares pueden ayudar a estudiar los focos de calor de las ciudades

Una mañana de mayo de 1927, el investigador Wilhelm Schmidt fijó un termómetro de mercurio a la puerta de su coche y circuló por Viena durante tres horas mientras medía la temperatura. Los mapas térmicos resultantes mostraban áreas más calientes que coincidían con «las partes densamente construidas del centro de la ciudad» y contornos más fríos que delimitaban las zonas arboladas, los parques y los cursos de agua. El trabajo de Schmidt fue el primero en ubicar las «islas» de calor de una ciudad en un «mar» circundante de temperaturas inferiores.

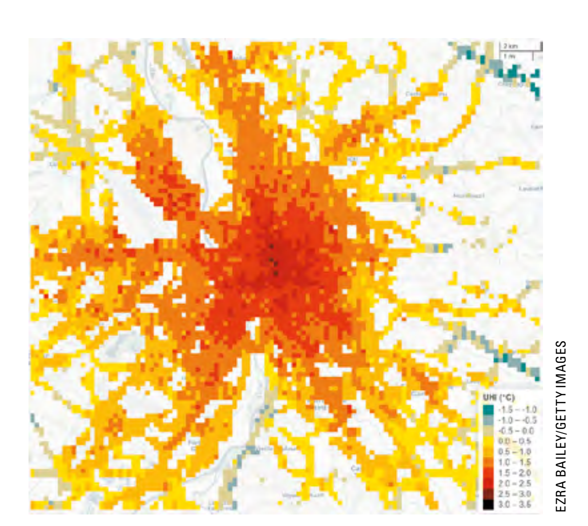
Durante la ola de calor que azotó Europa en 2003, esas islas estuvieron vinculadas con aproximadamente el 50 por ciento de las muertes atribuibles al calor en varias regiones de Inglaterra, así como con el incremento de mortalidad entre los ancianos de París. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. cita estas zonas como una de las principales causas de las 702 muertes anuales por calor que registró de media ese país entre 2004 y 2018. Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, lo que agrava los efectos locales del calentamiento global, y la situación va a peor.

La meteoróloga de la Universidad de Toulouse Eva Marques y sus colaboradores han usado una versión moderna de la técnica de Schmidt para cartografiar áreas de calor peligrosas. Su método emplea los termómetros de los turismos conectados a Internet para representar las variaciones de temperatura que se producen al desplazarnos tan solo unas pocas manzanas. Esos datos ayudarían a los urbanistas a desarrollar estrategias de mitigación del calor en lugares sin acceso a instrumentos complejos.

Las islas de calor urbanas surgen cuando la cubierta natural del suelo es reemplazada por asfalto, hormigón, acero u otros materiales que absorben y retienen más calor que su entorno. Como resultado, esas zonas permanecen a mayor temperatura, en especial durante la noche. Las islas de calor también afectan a la calidad del aire de las ciudades, pues influyen en la humedad y en la forma en que los contaminantes se distribuyen en la atmósfera. «Con el aumento de fenómenos extremos como las olas de calor, es preciso replantear el diseño de los espacios urbanos», advierte Marques.

Muchas ciudades carecen de redes de estaciones meteorológicas para realizar un seguimiento exhaustivo de las islas de calor, así que Marques y sus colegas recurrieron a los sensores conectados a Internet de los automóviles, que son cada vez más habituales. Primero recopilaron las temperaturas medidas por los vehículos en la ciudad de Toulouse (que dispone de estaciones meteorológicas de alta resolución con las que comparar) y examinaron el efecto de factores como las corrientes de aire sobre la precisión de los termómetros instalados en los coches. A continuación, elaboraron mapas de temperatura de varias ciudades de Europa occidental, usando una base de datos con millones de mediciones que había reunido un fabricante de automóviles entre 2016 y 2018.

Los investigadores descubrieron que podían calcular de manera fiable las variaciones



EZRA BAILEY/GETTY IMAGES

La isla de calor urbana alrededor de Toulouse se observa en los datos recogidos por los termómetros de los vehículos durante las noches del verano de 2018. Los colores más cálidos denotan un aire más caliente.

de temperatura en espacios de tan solo 200 por 200 metros a partir de datos detallados obtenidos a intervalos de 10 segundos. Este método les permitió evaluar el calor a pie de calle, donde las temperaturas varían localmente en función de la actividad humana, la geometría urbana tridimensional y la circulación del aire. Su trabajo se detalla en *Bulletin of the American Meteorological Society.*

«Los datos meteorológicos que registran los vehículos conectados a Internet representan una fuente desaprovechada de observaciones a microescala», según Amanda Siems-Anderson, científica del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU. (NCAR) ajena al estudio. «Este artículo ilustra un uso novedoso de esos datos.» Iain Stewart, experto en climatología urbana de la Universidad de Toronto que tampoco participó en el trabajo, añade que «es sugerente y señala futuras posibilidades para la recogida de datos en las ciudades».

Los sensores instalados de serie en los coches pueden proporcionar una gran cantidad de información meteorológica y climática, subraya Siems-Anderson. El reto estriba en garantizar la coherencia y la calidad de los datos, así como en construir una infraestructura robusta que permita extraerlos de un número suficiente de vehículos. Por ejemplo, el NCAR ya recopila datos de automóviles para complementar las predicciones meteorológicas mediante un sistema que se actualiza cada cinco minutos. Pero esos proyectos «suelen emplear entre diez y varios cientos de vehículos especiales, que no ofrecen una cobertura adecuada a menos que se encuentren en un área muy reducida», explica Siems-Anderson. Ir más allá de los estudios piloto requeriría un aumento de escala drástico. Además, es crucial controlar la calidad de los datos eventuales procedentes de vehículos que circulan casualmente por una determinada zona.

Las autoridades trabajan para lograrlo. En Estados Unidos, distintas iniciativas locales, estatales y nacionales aspiran a instalar y operar infraestructuras que recojan y procesen los datos de los vehículos conectados, así como a mejorar la precisión de las investigaciones del clima urbano impulsadas por la comunidad. El Departamento de Transporte, por ejemplo, ha desarrollado programas piloto en lugares como Nueva York y Wyoming para monitorizar el tráfico y las condiciones meteorológicas. Con el tiempo, esos datos podrían llenar los vacíos que dejan las estaciones meteorológicas fijas y permitir la localización y el seguimiento de las islas de calor urbanas, entre otras aplicaciones.

«Nuestros mapas ayudarían a entender mejor cómo influyen los cinturones verdes, los nuevos edificios y las masas de agua en las variaciones locales de temperatura», asegura Marques. Su objetivo es facilitar información sobre el clima urbano de cara a la elaboración de políticas. Por ejemplo, su equipo colabora con los funcionarios municipales de Toulouse para conseguir que los patios de los colegios sean espacios más verdes e identificar los barrios que precisan reformas para refrigerar los edificios de un modo más eficiente, aunque aún no han hecho uso de los mapas generados por vehículos. Y algunas pequeñas ciudades francesas quieren emplear mapas de calor para evaluar las condiciones urbanas, a pesar de no contar con complejas redes de estaciones meteorológicas, asegura Marques. «La recogida colaborativa de datos ofrece nuevas esperanzas de crear y compartir mapas con estos municipios en los próximos años», añade.

Según Stewart, es difícil elaborar mapas de temperatura tan precisos como para utilizarlos en la planificación urbanística, y la recopilación colectiva de los datos necesarios aún se halla en sus primeras etapas. Lo ideal sería que los mapas también incluyeran lugares más apartados donde se congrega la gente. Sin embargo, según Stewart, con el tiempo «las ciudades calurosas y masificadas de los países más pobres serán las que más se beneficien» de los mapas térmicos colaborativos. En el pasado, la climatología urbana no se ha ocupado demasiado de las ciudades con rentas bajas situadas en regiones tropicales, y muchas de ellas aún no tienen acceso a instrumentos de los que disfrutan otras partes del mundo, aunque están entre las más vulnerables al calentamiento urbano.

Disponer de mapas más detallados de esas ciudades ayudaría a los urbanistas a diseñar estrategias de mitigación y adaptación climática para lidiar con los puntos problemáticos de cada isla de calor. «La ventaja de este enfoque es que hay coches por todas partes», concluye Stewart, «así que tenemos el mundo entero al alcance de la mano».

Rachel Berkowitz

SALUD

ROTULADOR TOMAMUESTRAS

THOMAS FUCHS

Las puntas de fieltro resultan eficaces en la obtención de muestras médicas

Los escobillones y los tubos son elementos casi imprescindibles en la toma y el transporte de las muestras de sangre, saliva y otros líquidos en el laboratorio clínico, pero las muestras contenidas en las torundas de algodón se secan con rapidez y, a veces, es preciso trasvasar el contenido del tubo antes del análisis. Ahora se ha descubierto que la punta de fieltro del rotulador (sin tinta, por supuesto) podría ser un tomamuestras eficaz y duradero.

El físico Igor Popov y su equipo del Instituto de Física y Tecnología de Moscú compraron puntas de repuesto de una conocida marca de rotuladores, diseñadas para conservar húmeda la tinta mucho tiempo. Empaparon las puntas porosas en sangre o saliva que habían sido inoculadas con paracetamol, y hasta siete días después de permanecer a temperatura ambiente consiguieron detectar y cuantificar la concentración del analgésico en los tomamuestras improvisados al estilo de MacGyver. Popov afirma que funcionarían especialmente bien con fármacos y hormonas que no se degradan con rapidez. «Esta técnica podría ser útil en las investigaciones médicas que se realizan en condiciones difíciles, en sitios muy alejados de las grandes ciudades», aclara. El novedoso uso ha sido descrito en profundidad en dos artículos, uno publicado en *Acta Astronautica* y el otro en *Molecules*.

Otra aplicación se vislumbra como posible: en los viajes espaciales. Popov afirma que los tomamuestras usados en los análisis de los astronautas deben ser compactos, ligeros y fáciles de usar. Las muestras también deben poder guardarse fácilmente hasta el retorno a la Tierra; ahora mismo los tripulantes de la estación espacial usan tubos que ocupan un espacio valioso en el congelador.

La idea del rotulador «es una aplicación inédita que desconocía», confiesa Susan Richardson, química de la Universidad de Carolina del Sur, que no ha intervenido en el estudio. Matiza que en futuras investigaciones sería necesario analizar cuánto tiempo conservan los compuestos de interés su integridad en los líquidos corporales que, como la saliva, albergan bacterias que los pueden degradar.

Como paso siguiente, los autores compararán rotuladores de varios tipos para ver qué calidades (entre ellas, la composición, la forma y el tamaño de las puntas) resultan mejores de cara a la conservación de las muestras.

Maddie Bender

TELEDETECCIÓN

SATÉLITES HIPERESPECTRALES

Un nuevo satélite distingue con gran precisión los materiales presentes en la superficie terrestre

En breve, un nuevo instrumento permitirá analizar con exquisito detalle la superficie de la Tierra, desde el estado del suelo y las plantas que crecen en él hasta los pormenores de la dispersión urbana. La pasada primavera, un cohete Falcon 9 de la compañía SpaceX despegó de Florida para poner en órbita el satélite alemán EnMAP (Programa de Cartografía y Análisis Ambiental), que ha costado 300 millones de euros. A partir de otoño, los expertos en teledetección de todo el mundo podrán solicitar que el aparato apunte a objetivos concretos mientras orbita alrededor del planeta de polo a polo. «Estamos entusiasmados», comparte la investigadora

principal de EnMAP, Sabine Chabrillat, científica de la Tierra en el Centro Alemán de Investigación de Geociencias de Potsdam y la Universidad Leibniz de Hannover. «Tenemos plena confianza en que obtendremos datos de gran calidad.»

EnMAP forma parte de la próxima generación de misiones «hiperespectrales», que pretenden cubrir un gran vacío en el campo de la detección remota. En comparación con las cámaras ordinarias o multiespectrales, los sensores hiperespectrales registran un intervalo mucho más amplio del espectro electromagnético, captando las longitudes de onda características reflejadas por diversos materiales. Si bien hay otros satélites que estudian la dispersión urbana desde el espacio, estas huellas espectrales podrían revelar, por ejemplo, qué parte de ella se debe a las viviendas o al asfalto. Y donde otros satélites detectan una proliferación de algas tóxicas, los datos hiperespectrales permiten identificar las especies de fitoplancton responsables. «Nuestra comprensión de la biodiversidad en el mundo mejorará de forma sustancial», opina Susan Ustin, directora del Centro de Tecnologías Espaciales y Teledetección de la Universidad de California en Davis, que no participa en la misión.

Chabrillat se muestra impaciente por analizar el suelo de la Tierra, que sufre cada vez más daños como resultado de la agricultura industrial y el cambio climático. La tierra produce alimentos y almacena carbono, pero controlar su salud global supone un reto. «Nos falta una evaluación del estado actual de nuestros suelos», señala. «¿Están degradados? ¿Cuánto? ¿Dónde se encuentran los focos de la degradación?». EnMAP ayudará a responder estas preguntas de un vistazo.

Los científicos son conscientes del potencial de las imágenes hiperespectrales desde los años ochenta, pero ha habido pocas misiones. «Los gestores de la NASA no confiaban en que un proyecto satelital capaz de abordar múltiples cuestiones ecológicas y científicas recibiera financiación, alegando que una misión que actuara a modo de navaja multiusos no llegaría a despegar», explica Elizabeth Middleton, científica de la misión de demostración hiperespectral EO-1 de la NASA, que operó entre los años 2000 y 2017. Pero esas ideas han cambiado. «Dada la mayor preocupación por el cambio climático y la resiliencia a este, ha aumentado la demanda de información ambiental precisa», añade Ustin.

Los datos de libre acceso de EnMAP complementarán las observaciones de otras misiones, como el satélite de demostración italiano PRISMA, que se lanzó en 2019. Y tanto la NASA como la Agencia Espacial Europea pretenden llevar a cabo grandes misiones hiperespectrales antes del final de esta década para ampliar aún más nuestra visión de la superficie del planeta.

Megan I. Gannon

COMPORTAMIENTO ANIMAL

UNA CÁMARA PARA EL KRILL

Las filmaciones ayudan a describir la organización de los bancos de este crustáceo diminuto

El krill antártico forma las mayores congregaciones de biomasa del planeta. «Llegan a ser visibles desde el espacio», asegura Alicia Burns, etóloga en la Sociedad de Conservación Taronga de Australia. Los bancos de krill desempeñan un papel esencial en la red trófica y en el ciclo del carbono atmosférico en las profundidades de los mares australes. El modo en que esta suerte de camarones en miniatura forman y mantienen sus enormes bancos apenas se conoce. Pero Burns y sus colaboradores describen en *Proceedings of the Royal Society B* que unas normas sociales singulares y predecibles matemáticamente gobiernan sus bancos, en apariencia caóticos.

Con el fin de observar el comportamiento natatorio, los investigadores iniciaron una cooperación con el acuario de la División Antártica Australiana en Tasmania, una de las dos únicas instalaciones en todo el mundo donde crían krill. Allí lo filmaron desde ángulos distintos para seguir a los individuos en 3D y, a continuación, determinaron estadísticamente los patrones de desplazamiento de cada ejemplar en relación

con sus vecinos. «Aunar las matemáticas con la biología es la parte novedosa», explica Burns.

Geraint Tarling, biooceanógrafo en el Servicio Antártico Británico, ajeno al estudio, está de acuerdo: «Este es el primer paso que se ha dado de ofrecer una explicación teórica —lo que se prevé que [el krill] hará— a describir el comportamiento en el mundo real».

La agrupación ayuda a eludir a los depredadores, a encontrar pareja y alimento, así como a viajar con menos esfuerzo. El nuevo estudio reveló que, con la formación de esos enormes bancos, el krill, como tantas otras especies que nadan en grupo, ajusta su velocidad a la de los iguales que tiene delante, de modo similar a los conductores en la carretera. Pero a diferencia de otras especies, suele cambiar más a menudo de dirección según el plano vertical que ocupan sus vecinos, nadando hacia los que están situados por delante y por debajo, y alejándose, en cambio, de los que lo preceden por encima. Ryan Lukeman, matemático de la Universidad de St. Francis Xavier que estudia la dinámica de los bancos pero no ha participado en el estudio, afirma que es una diferencia fundamental con respecto a lo observado en los peces y las aves: para ellos, «tiende a haber poca transferencia de información en sentido vertical».

Los estudiosos todavía están barajando explicaciones del fenómeno. Los ojos del krill apuntan hacia arriba, y la parte ventral del cuerpo centellea con luz bioluminiscente cuando se alarma, afirma Tarling; quizá esas características


STOCKTREK IMAGES, INC./ALAMY STOCK PHOTO

Krill antártico (*Euphausia superba*).

expliquen su atención a la vertical cuando nada en grupo. Muchos depredadores atacan desde arriba o desde abajo, así que los crustáceos se vigilarían mutuamente en busca de señales de peligro inminente. También es posible que eviten así los vórtices generados por el pataleo de los vecinos, que a diferencia de los movimientos natatorios de los peces, empuja el agua hacia abajo y hacia atrás.

Burns aclara que el próximo objetivo será confirmar que las normas recién descubiertas se aplican en el medio natural mediante una «cámara para krill» suspendida de una boya. Lukeman afirma que algún día tal vez con ellas se simule la influencia que los cambios de temperatura y de las corrientes marinas podría tener sobre la capacidad de cohesión de este crustáceo tan minúsculo como trascendental.

Andrew Chapman

PALEONTOLOGÍA

PROFUSIÓN DE DINOSAURIOS

La alimentación de los dinosaurios herbívoros podría explicar la sorprendente variedad de fósiles hallados en Norteamérica

Si hubiéramos viajado hace 75 millones de años por lo que hoy es América del Norte, habríamos visto por doquier especies de dinosaurios enormemente diversas. La espectacular variación en los fósiles de este periodo, hallados en la mitad occidental del continente, lleva tiempo desconcertando a los paleontólogos. Algunos han propuesto que las montañas o los ríos podrían haber aislado a las poblaciones de dinosaurios, que habrían evolucionado para producir una mayor diversidad. Pero un estudio publicado en *Palaeontology* sugiere una posibilidad distinta. Según los autores, parte de la respuesta reside en lo que comían los dinosaurios herbívoros.

Para investigar la dieta de los dinosaurios, los paleontólogos analizan los isótopos geoquímicos (versiones de un mismo elemento que difieren en el número de neutrones) presentes en los huesos

fosilizados. Cuando los dinosaurios herbívoros digerían helechos y coníferas, por ejemplo, los isótopos de oxígeno, carbono y estroncio de esas plantas se acumulaban en diferentes proporciones. Los científicos han identificado las relaciones isotópicas asociadas a cada tipo de planta y las regiones donde crecía. El análisis de los isótopos contenidos en los huesos de dinosaurio puede indicar a los expertos no solo lo que comían estos animales, sino también dónde se aventuraban en busca de alimento.

En el nuevo estudio, el paleontólogo de la Universidad Carleton Thomas Cullen y sus colaboradores examinaron los ceratópsidos (dinosaurios con cuernos), anquilosaurios (dinosaurios acorazados) y hadrosaurios (dinosaurios «de pico de pato») de la Formación Oldman, en el sur de Alberta. Las relaciones isotópicas muestran que los dinosaurios cornudos y acorazados, que caminaban a cuatro patas y con la cabeza cerca del suelo, se alimentaban de plantas bajas en un área geográfica relativamente reducida. Sin embargo, los autores descubrieron que los dinosaurios de pico de pato eran capaces de alcanzar las hojas de los árboles, se alimentaban de una gama más amplia de plantas y recorrían distancias de hasta 100 kilómetros en busca de sustento. «Al principio me sorprendió lo diferentes que eran los hadrosaurios de los anquilosaurios y los ceratópsidos» en cuanto a sus hábitos alimenticios y sus desplazamientos, admite Cullen.

Si los dinosaurios cornudos y acorazados se alimentaban en zonas bastante delimitadas, esas restricciones nutricionales quizá contribuyeran a impulsar la evolución de numerosas especies nuevas en cada hábitat. En cambio, las especies con pico de pato, cuyos individuos se movían en áreas más extensas, presentan mucha menos variación. «Este estudio ilustra cómo el uso de técnicas analíticas geoquímicas de alta precisión continúa permitiendo a los paleontólogos interpretar la ecología y la biología de los ecosistemas antiguos», comenta Celina Suárez, geóloga de la Universidad de Arkansas ajena a la investigación.

Este tipo de trabajos podrían aportar nuevos datos sobre la distribución de las especies de dinosaurios hace 75 millones de años, opina Andrew Farke, conservador del Museo Raymond M. Alf de Paleontología de Claremont, en California, que tampoco participó en el estudio. «Apostaría a que la dieta de los hadrosaurios está relacionada con la amplia distribución de sus especies», concluye.

Riley Black

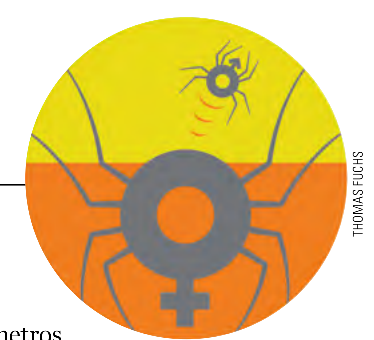


ALEXANDRE MORIN-LAPRISE/GETTY IMAGES

Huellas de anquilosaurio.

BIOMECÁNICA

CATAPULTA ARÁCNIDA



THOMAS FUCHS

Los machos de algunas especies de arañas huyen de un salto para sobrevivir al apareamiento

Para algunas arañas, el amor puede resultar devastador. En una práctica espeluznante conocida como canibalismo sexual, las hembras de muchas especies devoran a sus compañeros después de procrear, ya sea para alimentarse o para mantener abiertas sus opciones reproductivas.

Las arañas hembra suelen ser mucho más grandes que los machos, por lo que cuentan con una notable ventaja física. No obstante, un estudio publicado en *Current Biology* muestra cómo se protegen algunos machos. Valiéndose de la energía almacenada en las articulaciones de las patas delanteras, los machos de la especie *Philoponella prominens* pueden saltar lejos de una pareja voraz en una fracción de segundo. «Tras trece años estudiando la conducta sexual de las arañas, cuando observé sobre el terreno cómo se catapultaban, supe que había descubierto algo especial», comenta el autor principal del artículo, Shichang Zhang, ecólogo del comportamiento en la Universidad de Hubei.

Esas arañas viven en conjuntos de redes interconectadas que pueden alojar a más de 200 individuos. Con tantos solteros en el vecindario, las hembras pueden permitirse devorar a unos cuantos, de modo que los machos deben huir de inmediato tras procrear si quieren evitar convertirse en un aperitivo poscoital. Los investigadores observaron que las arañas macho pliegan las patas delanteras mientras se aparean, apoyándolas en la hembra. Nada más acabar, las enderezan y usan la presión hidráulica acumulada en las articulaciones tibia-metatarso para salir despedidos, como impulsados por un resorte.

Las arañas escapan de sus parejas tan deprisa que las cámaras habituales no logran captarlo. Así que los autores utilizaron una cámara especial de alta velocidad, cedida por una agencia publicitaria de Pekín, para filmar a las criaturas apareándose. Al estudiar la espectacular huida a 1500 fotogramas por segundo, hallaron que esas arañas de tres milímetros de longitud eran capaces de lanzarse a velocidades cercanas a 88 centímetros por segundo. «Es como si un hombre de metro ochenta saltara 530 metros en un segundo», compara Zhang. Mientras se elevan, los acróbatas arácnidos también giran sobre sí mismos cual peonzas de ocho patas, dando una media de casi 175 vueltas por segundo.

De las 155 parejas de arañas que filmaron en un principio, 152 machos lograron catapultarse y sobrevivir. Los tres restantes no escaparon a tiempo y fueron devorados, y otras arañas a las que los investigadores impidieron saltar corrieron la misma suerte.

Los machos que escapan son sorprendentemente fieles: durante la cópula, fijan una «cuerda de seguridad» de seda a su pareja. Y tras catapultarse, regresan por el hilo y se aparean de nuevo con ella. Llegan a repetir este ciclo hasta seis veces para aumentar las probabilidades de que la inseminación tenga éxito.

Aunque el canibalismo sexual parece algo espantoso desde una perspectiva humana, tiene un sentido evolutivo, explica Matthias Foellmer, biólogo de la Universidad Adelphi que estudia esta conducta en las arañas. En la mayoría de las especies, las arañas macho no aportan más que su esperma a la siguiente generación, por lo que las hembras no pierden nada si se los comen. «Visto así, es sorprendente que esta práctica no se halle más extendida», afirma Foellmer, que no participó en el estudio.

Según Foellmer, este trabajo ilustra cómo el canibalismo puede desencadenar una «carrera armamentística» evolutiva entre los sexos. Y añade que, aunque de momento la elevada tasa de fuga parece favorecer a los machos, «podría surgir una mutación que haga a las hembras un poco más veloces o más eficaces a la hora de apresarlos».

Jack Tamisiea

BIOLOGÍA CELULAR

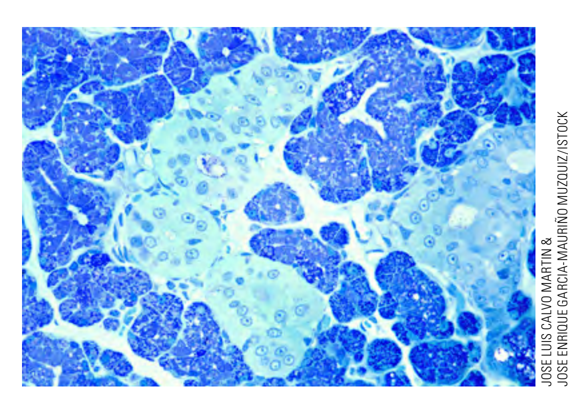
SECRETOS DE LA SALIVA

Un tipo de célula cutánea de rana se halla también en la boca de los mamíferos

El estudio en profundidad de las glándulas productoras de saliva de los mamíferos ha culminado hace poco con un descubrimiento sorprendente: la presencia de un tipo primitivo de célula que desde hace tiempo se consideraba exclusiva de los peces y los anfibios. Los hallazgos de este tipo no son nada habituales en la ciencia moderna, por lo que se cree que estas diminutas células podrían desempeñar muchas más funciones de las que se pensaba.

Los investigadores estaban intentando averiguar la identidad de la célula que fabrica cierta proteína implicada en el crecimiento y la reparación de las glándulas salivales. Por medio de una técnica denominada secuenciación del ARN de células individuales, aislaron células candidatas de unas glándulas de ratón y examinaron su función genética. Descubrieron así el gen de la proteína estimuladora del crecimiento de la glándula salival y, al mismo tiempo, que la célula productora era un ionocito, un tipo especializado que bombea partículas cargadas eléctricamente a través de las membranas. «Es una célula muy interesante», afirma Helen Makarenkova, investigadora de medicina molecular en el Instituto de Investigación Scripps y coautora del estudio publicado en *Cell Reports* con motivo del hallazgo.

Makarenkova afirma que «nunca se le ha prestado gran atención» al ionocito. Este tipo celular está bien documentado en la piel de los anfibios y los peces, donde contribuye a mantener el equilibrio de sales en el medio acuático. En 2018 supimos que contamos con una versión propia: investigadores de la Universidad Harvard descubrieron fortuitamente ionocitos en el epitelio pulmonar humano. Visto a posteriori, parece lógico que sean útiles en un tejido húmedo y permeable como ese, opina el biólogo de sistemas Allon M. Klein, miembro de aquel equipo pero ajeno a la investigación reciente. «La piel de la rana se parece mucho al epitelio de las vías respiratorias [humanas]», asegura.



JOSE LUIS CALVO MARTIN & JOSE ENRIQUE GARCIA-MAURIÑO MUZQUIZ/ISTOCK

Glándula salival humana.

Ahora plantean que los ionocitos de las glándulas salivales probablemente regulen el *p*H y la viscosidad de la saliva y segreguen el factor de crecimiento esencial para reparar la glándula. Aunque todavía no se los ha observado en las glándulas salivales humanas, el factor de crecimiento que producen sí ha sido aislado de nuestra saliva.

¿Por qué han pasado inadvertidos tanto tiempo los ionocitos de mamífero? Por una parte, hace solo una década que disponemos de la secuenciación del ARN de una sola célula, que sigue siendo una técnica relativamente cara. Por la otra, son células escasas y pequeñas, con alrededor de un cuarto del tamaño del de la mayoría de las células de mamífero. «Si se comparan con los principales componentes del tejido, son muy poco abundantes», señala Klein. El experto especula que tal vez estén también presentes en otros tejidos de los mamíferos, como el epitelio intestinal.

El paso siguiente de Makarenkova será confirmar la existencia de estas células en las glándulas salivales humanas e investigar las posibilidades que ofrecen en el tratamiento de trastornos como la sequedad bucal en los casos motivados por la escasez o la alteración de las células. Le gustaría buscarlos en otros tejidos e investigar su función: «Los ionocitos podrían estar bastante extendidos».

Joanna Thompson

MEDICINA

INSULINA DE CARACOLA

El veneno mortal de un molusco podría inspirar tratamientos que salvarían vidas

Si queremos coger un cono de mar vivo en la orilla por el gusto de coleccionarlo, tendremos que ser cautos, pues algunos poseen un dardo lleno de veneno fulminante que puede causar la muerte. Conocer por qué esta sustancia afecta con suma rapidez a partes esenciales del organismo podría inspirar medicamentos que salven vidas: el veneno del cono marino contiene insulina, una hormona que ayuda a las células a metabolizar la glucosa de la sangre y que muchas personas diabéticas se inyectan a diario.

Pero la insulina de este molusco gasterópodo tiene algo especial, ya que reduce con rapidez la concentración de glucosa en la sangre de sus presas. La insulina humana actúa con mucha más lentitud; tiende a formar agregados que la estabilizan y facilitan su almacenamiento en el cuerpo, pero impiden que cumpla su función hasta que no se disgrega. La insulina del cono de mar podría brindar pistas para crear una insulina que no se agregue y surta efecto rápido.

En un estudio publicado en *Nature Chemical Biology*, la bióloga de la Universidad de Copenhague Helena Safavi-Hemami y sus colaboradores han demostrado la peculiar morfología de la insulina del cono de Kinoshita (*Conus kinoshitai*). El equipo incorporó regiones únicas de esta molécula a la insulina humana y creó así un híbrido que carece de la región humana responsable de la agregación.



JON G. FULLER/VWPICS/ALAMY STOCK PHOTO

Cono de Kinoshita.

En 2020, otros investigadores lograron un hito similar con la insulina del cono geógrafo (*Conus geographus*). Desde entonces han estudiado otras especies y han descubierto que el cono de Kinoshita fabrica una insulina que actúa de un modo nunca visto. La región agregante de la molécula de insulina humana también es esencial para su unión a los receptores celulares; en la insulina del cono geógrafo esa región está truncada. La del cono de Kinoshita también carece oportunamente de esa parte, pero, en cambio, posee una singular región alargada que se une a los receptores sin producir agregados.

Cuando Safavi-Hemami le mostró la nueva insulina de caracola a su colega de la Universidad Stanford, Danny Hung-Chieh Chou, recuerda que dijo: «No es nada nuevo». Pero, cuando ahondaron más, observaron que las características biológicas eran muy distintas. Mediante técnicas de imagen punteras visualizaron con claridad cómo el nuevo híbrido se fijaba al receptor celular de la insulina y modificaba su forma, algo que no se conocía en el híbrido precedente. Estos hallazgos ayudarán a conocer mejor el mecanismo de acción de las insulinas en general, señala Mike Strauss, bioquímico en la Universidad McGill ajeno al estudio. «Abre nuevas posibilidades en el campo de las insulinas sintéticas», añade.

Por ahora el equipo continúa investigando la seguridad y la estabilidad del híbrido, problemas que entraña el diseño de una insulina que no se agregue y que esta molécula de forma tan extraña podría solventar.

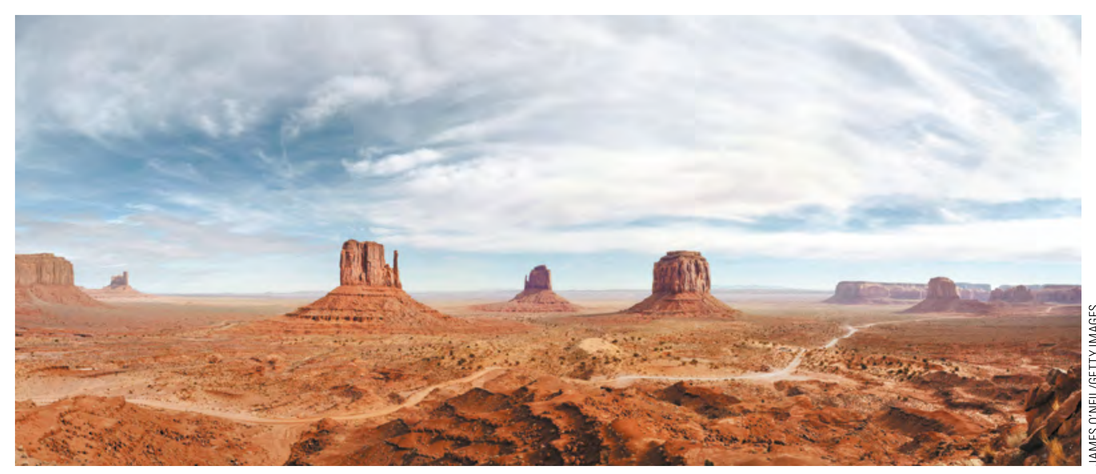
Aun así, tendrá que superar multitud de pruebas. «Por eso es bueno disponer de un repertorio», dice Safavi-Hemami. Cada especie de cono posee una mezcla venenosa propia que probablemente contenga tipos únicos de insulina y otras moléculas valiosas. A la vista de los miles de sustancias que componen el veneno, todo hace pensar que el estudio detallado de estas caracolas nos deparará numerosos descubrimientos.

Anna Rogers

CIENCIAS ATMOSFÉRICAS

AIRE SEDIENTO

La atmósfera del Oeste estadounidense extrae cada vez más humedad del suelo, lo que favorece las sequías y los incendios



JAMES O'NEIL/GETTY IMAGES

El valle de los Monumentos, en Arizona.

En general, pensamos en la sequía como una mera escasez de lluvia y nieve. Sin embargo, la «demanda evaporativa» (término que describe la capacidad de la atmósfera para extraer la humedad del suelo) también es un factor relevante. Y un estudio publicado en *Journal of Hydrometeorology* revela que, desde hace 40 años, la atmósfera de buena parte de Estados Unidos tiene cada vez más sed.

Podemos considerar la demanda evaporativa como una especie de «coeficiente de secado de la colada», explica Stephanie McAfee, climatóloga del estado de Nevada que no participó en el trabajo. Cuando tendemos la ropa en el exterior, «sabemos que se secará mejor y más rápido si hace calor, sol y viento, y no hay humedad». Ese coeficiente no crece paulatinamente con el calentamiento del clima, sino que lo hace de forma exponencial, según Christine Albano, ecohidróloga del Instituto de Investigaciones del Desierto, en Reno, y primera autora del artículo. «Un aumento de temperatura de uno o dos grados incrementa mucho la demanda evaporativa.»

Para determinar cómo ha cambiado la sed atmosférica, Albano y sus colaboradores examinaron cinco series de datos que abarcaban desde 1980 hasta 2020 y que incluían factores como la temperatura, la velocidad del viento, la radiación solar y la humedad, todos los cuales contribuyen a la demanda evaporativa. Hallaron que los mayores aumentos de EE.UU. se habían producido en los estados del suroeste, mientras que, en el este, la humedad compensaba el efecto de la temperatura. En la región del río Grande, la atmósfera demandaba entre 135 y 235 milímetros más de agua por año en 2020 que en 1980, lo que supone un aumento de entre el 8 y el 15 por ciento. Esa agua se evaporó en vez de saciar los campos y llenar los acuíferos. (Un incremento del 10 por ciento significa que un mismo cultivo, gestionado de la misma forma, necesita ahora un 10 por ciento más de agua para ser igual de productivo que hace 40 años.)

Junto con las temperaturas más altas y la menor humedad, el estudio también subraya el aumento en la velocidad del viento y la radiación solar. En las regiones áridas, la humedad disminuye a medida que ascienden las temperaturas. Albano admite que aún no sabe a ciencia cierta por qué están cambiando la luz solar y el viento.

El aumento de la demanda evaporativa se suma a la histórica sequía que padece el Oeste estadounidense, con unas condiciones que no se habían dado en los últimos 1200 años. Ese

aumento contribuyó a que, en la primavera de 2021, bajara menos agua de deshielo de la prevista en la cordillera de Sierra Nevada, señala Albano. La atmósfera más sedienta también secó los bosques de la región, lo que provocó mayores incendios forestales.

El trabajo muestra que los gestores de recursos «deben pensar detenidamente en cómo cerciorarnos de que controlamos la cantidad de agua que consumimos», señala Caroline Juang, científica de la Tierra de la Universidad de Columbia ajena al estudio.

«Diez centímetros de lluvia no dan para tanto como antes», concluye McAfee. «La atmósfera quiere dar sorbos más grandes.»

Ula Chrobak

BIOLOGÍA

CONSTRICCIÓN SELECTIVA

Las serpientes constrictoras consiguen respirar mientras estrangulan a sus presas hasta la muerte

En el abrazo mortal que la boa o las serpientes estranguladoras en general dan a sus presas no solo queda oprimido el cuerpo de la víctima, sino también los pulmones del ofidio. Ahora un nuevo estudio revela la compleja técnica respiratoria a la que recurren estos notables reptiles para no sucumbir a la asfixia.

A diferencia de los mamíferos, que se sirven del diafragma para henchir la cavidad pulmonar, las serpientes accionan una serie de músculos repartidos por su larga caja torácica. El problema surge porque el estrangulamiento de un animal, que además se debate con todas sus fuerzas, limita el movimiento de los músculos respiratorios de la cazadora. Cómo sobrevive esta a la constricción era una incógnita sin resolver desde hacía tiempo.

Un equipo de investigación encabezado por John Capano, de la Universidad Brown, describe en el *Journal of Experimental Biology* que las boas constrictoras activan más músculos intercostales en las partes del tórax que no están empeñadas en cada momento. De ese modo pequeños tramos de los pulmones siguen funcionando como una bomba y succionan el aire a través de las zonas constreñidas para absorber tanto oxígeno como sea posible. «A menudo, las partes del pulmón que no están ventilando [por estar comprimidas] quedan prácticamente hundidas», explica Capano.

Con el fin de desentrañar el proceso, envolvieron ejemplares de boa con manguitos medidores de la presión arterial para impedir que expandieran ciertas partes del tórax y, a continuación, midieron el flujo respiratorio colocándoles pequeñas mascarillas en el hocico. Por desgracia, a las serpientes no les gustó nada la idea: «Uno de los mayores esfuerzos fue lograr que se habituaran a ellas».



PAUL STAROSTA/GETTY IMAGES

Boa constrictor.

Al fin pudieron ver cómo se sirven de la respiración selectiva para tomar aire pese a la presión ejercida por los manguitos. Los registros de la actividad eléctrica y las radiografías confirmaron que los impulsos nerviosos activan justamente los músculos de las zonas desembarazadas; ni siquiera intentan respirar con los tramos constreñidos de la caja torácica, solo accionan la musculatura intercostal que conserva la movilidad. Creen que esa facultad debió surgir en el pasado remoto, pues les permitió engullir presas más grandes.

«Los experimentos biomecánicos del equipo demuestran grandes dotes de ingenio», opina Eletra de Souza, herpetóloga especialista en ofidios de la Universidad de São Paulo, ajena al estudio. «Siempre me han sorprendido las adaptaciones óseas y morfológicas de los ofidios. Asombra lo bien que se las apañan sin extremidades.»

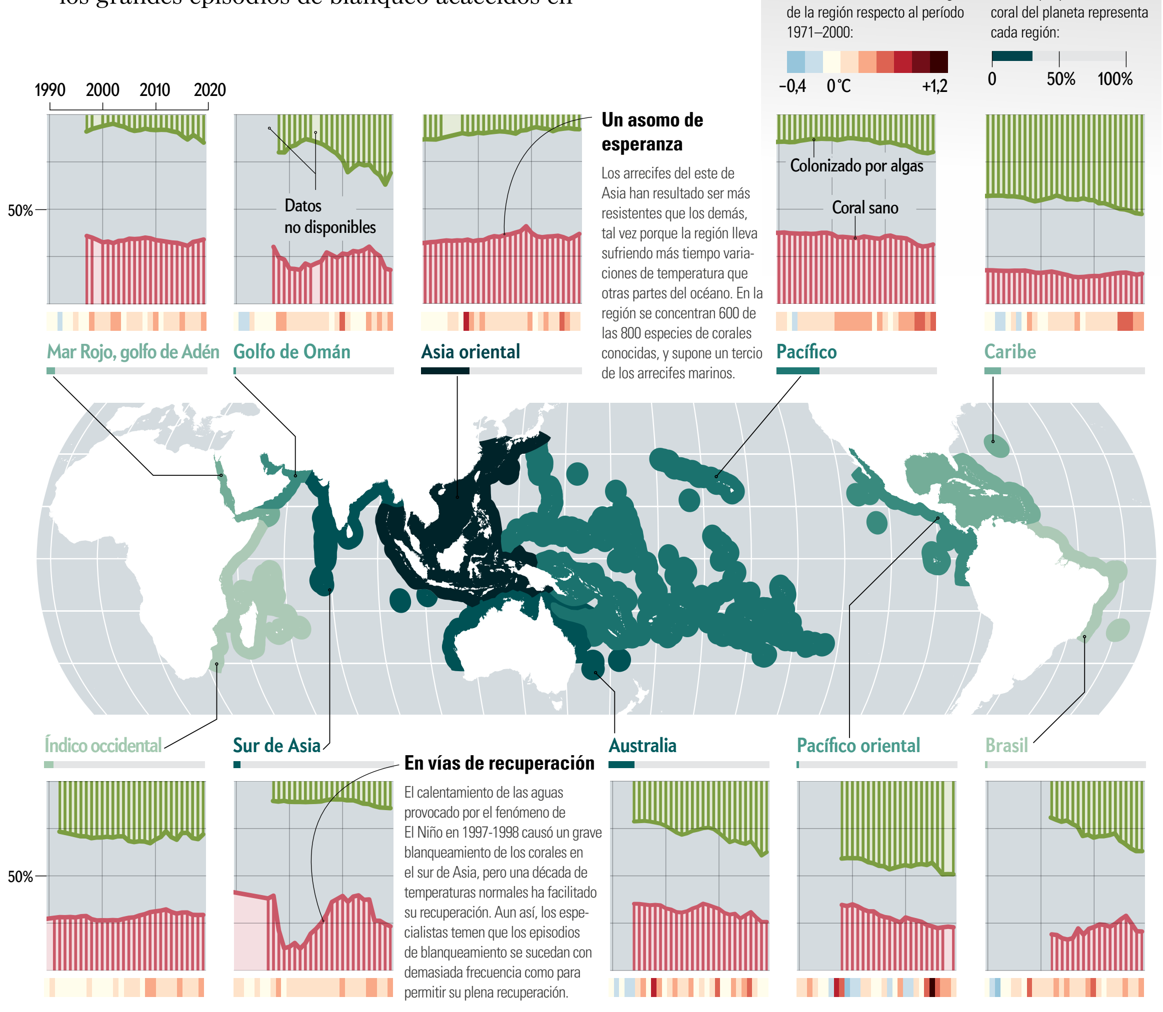
Lars Fischer y Joanna Thompson

CHEQUEO A LOS ARRECIFES DEL PLANETA

El pronóstico no es tan malo

Las Naciones Unidas han presentado un demoledor informe sobre el estado de salud de los arrecifes coralinos del planeta. La extensión del coral sano, allí donde los pólipos y las algas coloridas tapizan los esqueletos blancos de coral pétreo, ha disminuido un 14 por ciento en la pasada década. La urbanización de las costas, la contaminación del mar por plásticos y la sobrepesca son, en parte, culpables, pues facilitan la proliferación de las algas nocivas. Pero la mayor amenaza proviene del calentamiento de los mares, que blanquea el coral. Con todo, el relato contiene algunos puntos de optimismo. El coral ha rebrotado después de los grandes episodios de blanqueo acaecidos en 1998 y 2005, lo cual demuestra que la recuperación es posible. Y los arrecifes que albergan la mayor diversidad, el llamado triángulo del coral, en el Pacífico occidental, parecen aguantar bien.

Katie Peek



FUENTES: «STATUS OF CORAL REEFS OF THE WORLD: 2020», POR ICRI, GCRMN, INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS DE AUSTRALIA Y UNEP; NOAA (*datos de la temperatura de la superficie marina*).

LA IMAGEN DEL MES

EL SEMILETARGO DEL COLIBRÍ

Le permite ahorrar energía y evitar los peligros del letargo profundo



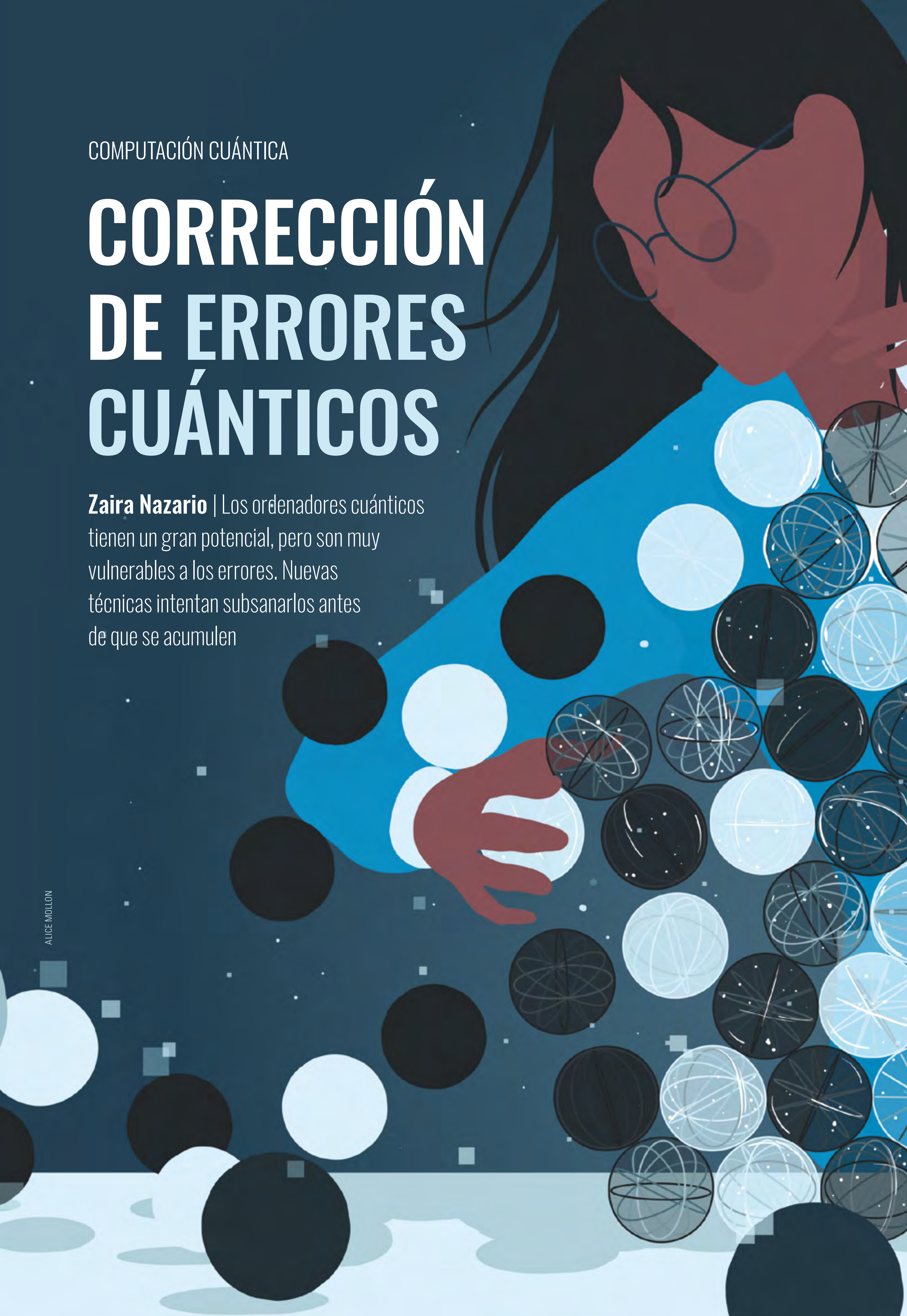
IGNACIO YUFERA/FLPA/MINDEN PICTURES

Durante la noche, los colibríes reducen la temperatura corporal y entran en letargo. Ahorran así entre el 60 y el 90 por ciento de la energía consumida cada hora, explica Anusha Shankar, ecóloga de la Universidad Cornell y autora principal de un nuevo estudio sobre el fenómeno. Pero, pese a ser fundamental para el modo de vida de estas aves, el letargo profundo no está exento de contrapartidas: los colibríes permanecen rígidos, indefensos ante las amenazas. El equipo de Shankar ha descubierto que algunos se sumen en un letargo menos profundo en el que alcanzan temperaturas intermedias, gracias a un control más fino del termostato corporal.

Los autores estudiaron los colibríes en su medio natural, en el sureste de Arizona. Capturaron ejemplares antes del anochecer y los colocaron en recintos cerrados al aire libre. A medida que avanzaba la noche, los grababan con cámaras infrarrojas y registraban su temperatura corporal. Las tres especies estudiadas pasaban entre el 5 y el 35 por ciento de la noche sumidas en el letargo superficial. El resto del tiempo se hallaban con la temperatura normal, en letargo profundo o bien en transición de un estado a otro.

El semiletargo permitiría a los colibríes beneficiarse de las virtudes reparadoras del sueño y, al mismo tiempo, evitar algunos de los peligros que entraña el letargo profundo, como la reducción de la función inmunitaria, que se han observado en otros animales, aclara Shankar. El hallazgo plantea muchas otras preguntasm que ella y otros investigadores están comenzando a abordar, como qué provoca esos cambios en el letargo y cómo regulan estas aves tan drásticas variaciones térmicas.

Carolyn Wilke



COMPUTACIÓN CUÁNTICA

CORRECCIÓN DE ERRORES CUÁNTICOS

Zaira Nazario | Los ordenadores cuánticos tienen un gran potencial, pero son muy vulnerables a los errores. Nuevas técnicas intentan subsanarlos antes de que se acumulen

ALICE MOLLON

En física, todo lo que no está prohibido es obligatorio. En consecuencia, los errores son inevitables y aparecen por doquier: en el lenguaje, la cocina, las comunicaciones, el pro-cesamiento de imágenes y, por supuesto, la computación. Mitigarlos o corregirlos es lo que mantiene a la sociedad en marcha. Podemos arañar un DVD y que siga funcionando, los códigos QR borrosos o rasgados continúan siendo legibles, y las imágenes procedentes de las sondas espaciales viajan cientos de millones de kilómetros y aun así conservan su nitidez. La corrección de errores es uno de los conceptos más básicos en la tecnología de la información. Y es que puede que los errores sean inevitables, pero también son subsanables.

Esa inevitabilidad es aplicable también a los ordenadores cuánticos. Estas nuevas máquinas aprovechan las reglas fundamentales de la física para resolver problemas que resultan intratables usando ordenadores clásicos. Podrían tener profundas implicaciones para la ciencia y los negocios, pero su gran potencia trae consigo grandes vulnerabilidades: los ordenadores cuánticos sufren errores que no afectan a los ordenadores clásicos, por lo que nuestras técnicas de corrección habituales no pueden paliarlos.

Soy una física que trabaja en computación cuántica en IBM, pero no fue allí donde se inició mi carrera. Empecé como teórica de la materia condensada, investigando comportamientos cuánticos de los materiales, tales como la superconductividad. En aquellos momentos ignoraba que eso me conduciría a la computación cuántica, algo que vino más tarde, cuando hice un paréntesis para trabajar en política científica en el Departamento de Estado de EE.UU. De ahí pasé a la Agencia de Proyectos Avanzados de Inteligencia (IARPA, por sus siglas en inglés), donde traté de aplicar los fundamentos de la naturaleza al desarrollo de nuevas técnicas.

Los ordenadores cuánticos daban por entonces sus primeros pasos. Aunque Paul Benioff, del Laboratorio Nacional Argonne, los había propuesto en 1980, los físicos tardaron casi dos décadas en construir el primero. Un decenio después, en 2007, inventaron la unidad básica de datos que emplean los ordenadores cuánticos de IBM, Google y otras compañías, conocida como qubit transmón superconductor (donde «qubit» es el acrónimo inglés de «bit cuántico»). De repente, mi experiencia en superconductividad estaba muy solicitada. Ayudé a desarrollar varios programas de investigación sobre ordenadores cuánticos en IARPA y luego comencé a trabajar en IBM.

Allí me dediqué a mejorar las operaciones entre varios qubits conectados y a estudiar el modo de corregir los errores. Combinando qubits a través de un fenómeno cuántico denominado entrelazamiento [*véase* «Acción fantasmal», por Ronald Hanson y Krister Shalm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2019], es posible almacenar colectivamente gran cantidad de información, mucha más que en el mismo número de bits ordinarios. Como los estados de los qubits están asociados a ondas, pueden interferir (igual que las ondas luminosas), generando un panorama computacional mucho más rico que el que resulta simplemente de cambiar bits. Gracias a ello, los ordenadores cuánticos llevan a cabo ciertas funciones de forma muy eficaz y podrían acometer una gran variedad de tareas: simular la naturaleza, investigar y diseñar nuevos materiales, descubrir propiedades ocultas en los datos para mejorar el aprendizaje automático, o encontrar catalizadores más eficientes para los procesos químicos industriales.

El problema radica en que muchas de las propuestas para resolver problemas importantes requieren que los ordenadores cuánticos realicen miles de millones de operaciones lógicas (por medio de «puertas») con cientos o miles de qubits. Eso exige que se produzca, como mucho, un error cada mil millones de puertas. Sin embargo, las mejores máquinas actuales cometen un error cada mil puertas. Dada esta enorme brecha entre teoría y práctica, en un principio los físicos temieron que la computación cuántica nunca pasara de ser una mera curiosidad científica.

EN SÍNTESIS

Los ordenadores cuánticos aprovechan fenómenos como la superposición y el entrelazamiento para superar las capacidades de las máquinas clásicas, y podrían tener muchas aplicaciones.

Pero esos dispositivos presentan errores que no pueden subsanarse mediante las técnicas habituales, lo que ha llevado al desarrollo de nuevos métodos de corrección y mitigación.

Si queremos que los ordenadores cuánticos resulten útiles, hay que optimizar los equipos y los códigos de corrección a fin de evitar que se acumulen los errores sin que se dispare el coste computacional.

Corrección de errores

La situación cambió en 1995, cuando Peter Shor, de los Laboratorios Bell, y Andrew Steane, de la Universidad de Oxford, desarrollaron por separado la corrección de errores cuánticos. Mostraron que los físicos pueden distribuir la información contenida en un qubit entre varios qubits físicos y así construir ordenadores cuánticos fiables a partir de componentes que no lo son tanto. Siempre que los qubits físicos tengan una calidad suficiente, de modo que su tasa de error se mantenga por debajo de cierto límite, es posible eliminar los errores más deprisa de lo que se acumulan.

Para entender por qué la propuesta de Shor y Steane supuso un avance tan importante, veamos cómo funciona la corrección habitual de errores. Un código de corrección sencillo realiza copias de seguridad de la información: por ejemplo, representa un 0 como 000 y un 1 como 111. De esta forma, si nuestro ordenador lee 010, sabe que el valor original probablemente era 0. Este código funciona bien cuando la tasa de error es tan baja como para que se corrompa, a lo sumo, una copia del bit. Los ingenieros diseñan los equipos más fiables que pueden y luego añaden capas de redundancia para eliminar cualquier posible error.

Sin embargo, no estaba claro cómo adaptar esos métodos clásicos a los ordenadores cuánticos. Dado que la información cuántica no se puede copiar, para corregir los errores hay que caracterizarlos mediante mediciones. El problema es que, al examinar los qubits, podemos hacer que su estado «colapse», es decir, destruir la información cuántica que almacenan. Más aún, en los ordenadores cuánticos, también aparecen errores en la fase de las ondas que describen los estados de los qubits, y no solo en los valores de estos.

Para sortear todos estos obstáculos, las estrategias de corrección de errores cuánticos emplean qubits auxiliares. Una serie de puertas entrelazan los qubits originales con los auxiliares, y así se consigue transferir el ruido del sistema a estos últimos. Al medir los qubits auxiliares, obtenemos suficiente información para identificar los errores sin tocar el sistema que nos interesa, lo cual nos permite enmendarlos.

Al igual que en la corrección de errores clásicos, el éxito de este método depende de la física del ruido. En los ordenadores cuánticos, los errores surgen cuando el dispositivo se entrelaza con su entorno. Para que el ordenador siga funcionando, la tasa de errores físicos ha de ser suficientemente baja: existe un valor crítico por debajo del cual es posible corregir los errores y hacer la probabilidad de que el ordenador falle tan pequeña como queramos. Por encima de ese umbral, sin embargo, el equipo introduce errores

Bits y qubits

Los ordenadores cuánticos aprovechan las reglas de la mecánica cuántica para superar las capacidades de las máquinas clásicas. Los qubits pueden estar en una «superposición» de varios estados, y el fenómeno cuántico del entrelazamiento relaciona los qubits de manera inextricable: si tenemos dos qubits entrelazados y medimos uno de ellos, obtenemos un resultado aleatorio, pero eso determina al instante el estado del otro. Los qubits entrelazados contienen más información que los dos qubits por separado.

DEL BIT...

Un bit clásico puede estar en uno de dos estados (0 o 1), como las dos caras de una moneda.

... AL QUBIT...

Un qubit tiene infinitos estados posibles, que cabe visualizar como los puntos de una esfera. Cada punto corresponde a una cierta superposición de los estados 0 y 1 (la figura muestra un ejemplo). Pero si medimos el qubit, cualquiera de estas posibilidades «colapsa» a un único estado: 0 o 1.

... A LOS QUBITS ENTRELAZADOS

Si dos qubits están entrelazados, sus estados ya no son independientes: si medimos el estado de uno, sabremos al instante el del otro, sin tener que realizar ninguna medición adicional. El efecto persiste sin importar la distancia que separe a los qubits.

JEN CHRISTIANSEN

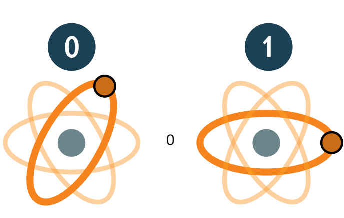
Circuitos cuánticos

Los circuitos cuánticos son representaciones abstractas de las operaciones cuánticas, y son análogos a los circuitos de la teoría de la computación clásica. Estos diagramas omiten los detalles físicos de los qubits (si son transmones superconductores o cualquier otro dispositivo) y se centran en las operaciones que realizan.

Un ordenador cuántico se puede construir de diversas maneras, usando distintos sistemas para implementar los qubits. A continuación se muestran las tres opciones más habituales.

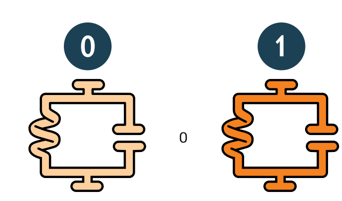
Qubits de iones atómicos

La órbita del electrón define el estado cuántico.



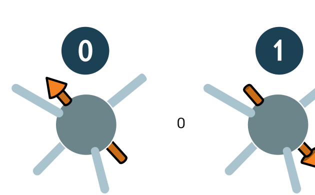
Qubits superconductores

La superposición de la carga eléctrica define el estado cuántico.

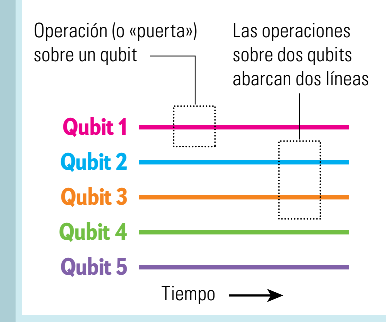


Qubits de espines de estado sólido

El espín de un átomo concreto de una red define el estado cuántico.

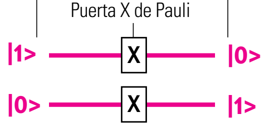


Sea cual sea la forma física de los qubits, sus operaciones pueden representarse mediante diagramas de circuitos cuánticos que recuerdan a una partitura. Cada línea horizontal representa un qubit, y las notas corresponderían a las operaciones o «puertas». Al igual que ocurre con la notación musical, los diagramas de circuitos deben leerse de forma secuencial: muestran la sucesión de operaciones que se realizan sobre cada uno de los qubits.



Las diferentes puertas representan operaciones distintas.

Una inversión de bit, o puerta X de Pauli (X), cambia el qubit: si es 1, pasa a 0, y viceversa.

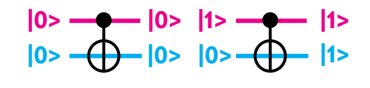


Una puerta de Hadamard (H) pone el qubit en un estado de superposición.

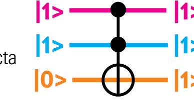
$|0\rangle$ —H— $\frac{(0+1)}{\sqrt{2}}$

$|1\rangle$ —H— $\frac{(0-1)}{\sqrt{2}}$

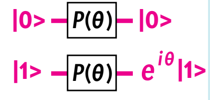
Si un símbolo está conectado con otro qubit por una línea vertical, la inversión depende del valor del otro qubit: tenemos una puerta NOT controlada (CNOT).



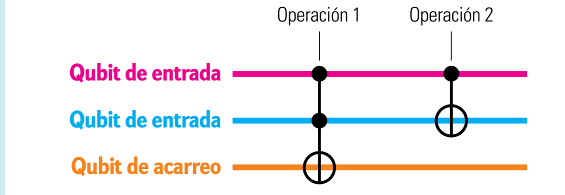
Una puerta de Toffoli es una puerta NOT controlada que conecta al menos tres qubits.

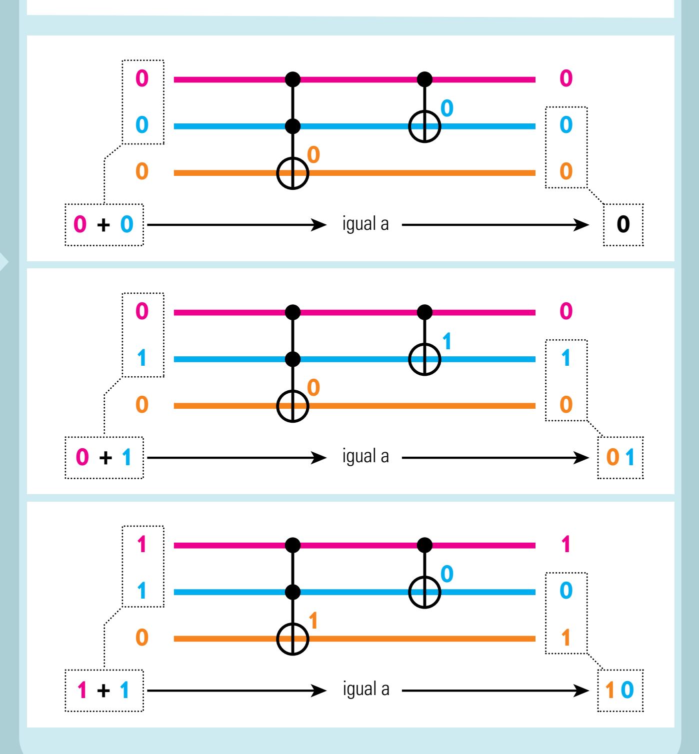


Una puerta de fase (P(θ)) rota el qubit un ángulo θ en torno al eje Z.

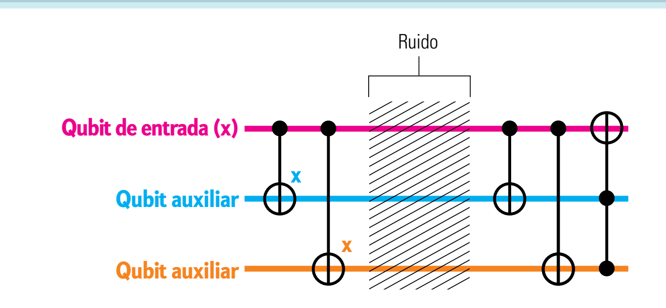


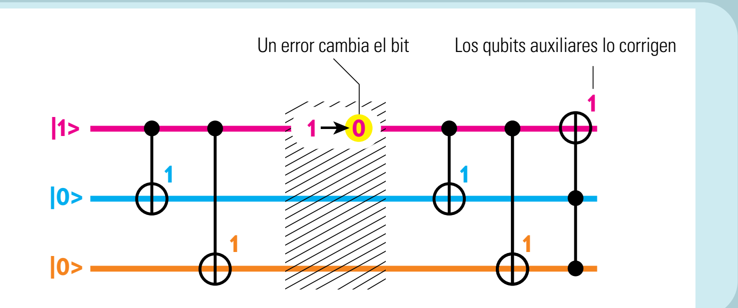
Este sencillo circuito implementa la adición. Toma dos qubits de entrada y calcula su suma, con un qubit adicional que representa el acarreo. El circuito consiste en una puerta de Toffoli (una puerta NOT doblemente controlada) y una puerta CNOT. Los siguientes tres ejemplos ilustran su funcionamiento.





Cada puerta tiene una tasa de error, una probabilidad de que su implementación física dé un valor incorrecto (como si un músico tocara una nota equivocada). Sin corrección de errores, los circuitos fallan con una probabilidad que es directamente proporcional a la tasa de error de las puertas: con el tiempo tendríamos tantas notas incorrectas que la pieza musical sería irreconocible. Pero, si usamos qubits auxiliares, un circuito cuántico puede detectar y corregir los problemas. Aquí vemos un circuito simple de corrección de errores. Funciona codificando la información de un solo qubit en tres qubits y determinando si dos de ellos son iguales, para dos pares distintos: un par indica si ha ocurrido un error, dos pares identifican el qubit afectado y la puerta de Toffoli aplica la corrección. Así, podemos extraer información sobre el error sin tocar la información cuántica ni saber nada sobre ella.





JEN CHRISTIANSEN

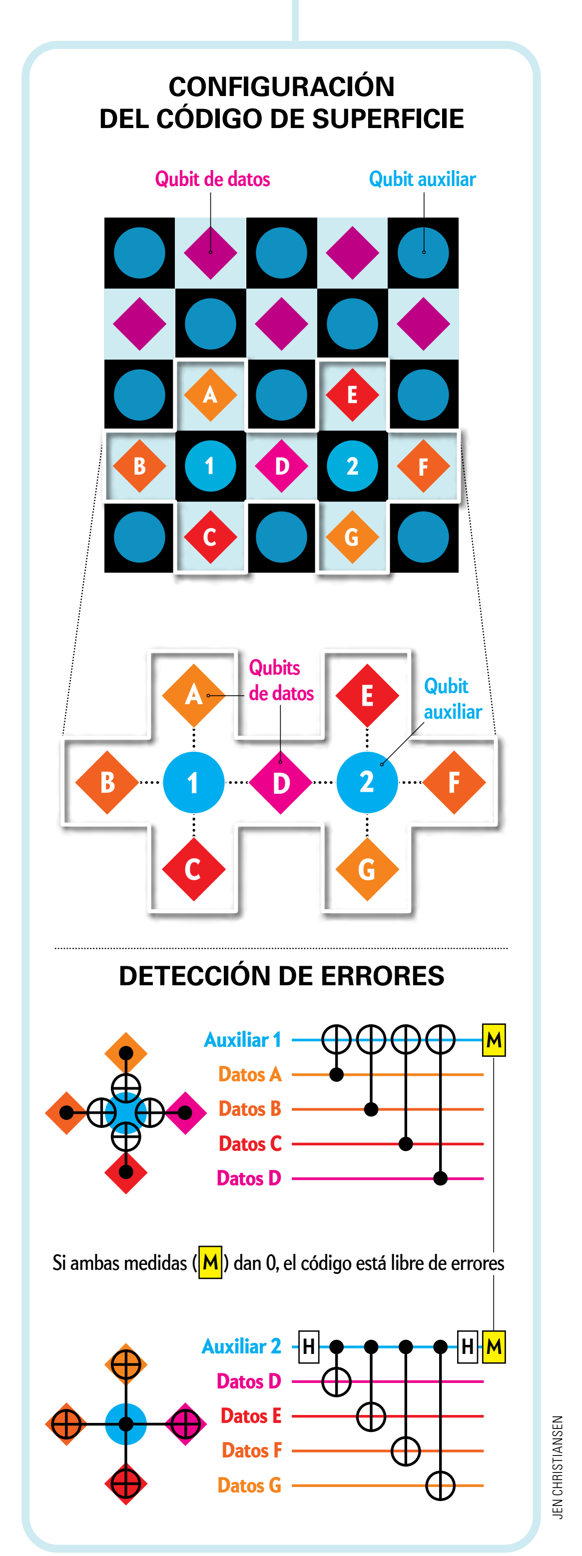
más rápido de lo que podemos subsanarlos. Este cambio de comportamiento es, en esencia, una transición de fase entre un estado ordenado y otro desordenado. Y eso me resultó fascinante, dado que, como física teórica de la materia condensada, había pasado gran parte de mi carrera estudiando transiciones de fase cuánticas.

Seguimos investigando formas de mejorar los códigos de corrección para que puedan manejar una mayor tasa de errores, una variedad más amplia de fallos y las limitaciones que impone el dispositivo. Los códigos de corrección de errores más populares son los «códigos cuánticos topológicos». Sus orígenes se remontan a 1982, cuando Frank Wilczek, que por entonces trabajaba en la Universidad de California en Santa Bárbara, sugirió que el universo podía contener un tipo totalmente nuevo de partículas. A diferencia de las partículas conocidas, que poseen un espín entero o semientero, las propuestas por Wilczek presentarían valores fraccionarios intermedios. El científico las llamó alones y advirtió de que «sus aplicaciones prácticas parecen remotas» [*véase* «Alones», por Frank Wilczek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1991].

Pero los físicos no tardaron en descubrir que los alones no eran tan esotéricos, sino que están asociados a fenómenos del mundo real. Para consumar su transición de la teoría pura a las aplicaciones técnicas, Alexei Kitaev, del Instituto de Tecnología de California, puso de manifiesto que los alones constituyen una formulación útil de la computación cuántica. Asimismo, propuso emplear ciertos sistemas de muchas partículas como códigos de corrección de errores cuánticos.

Las partículas de esos sistemas están conectadas en una estructura reticular, y su estado de energía mínima está muy entrelazado. Los errores se corresponden con un estado excitado (de mayor energía) del sistema, y las excitaciones son justo los alones. Así nacieron los códigos topológicos, que establecieron un nuevo vínculo entre la física de la materia condensada y la corrección de errores cuánticos. Como se espera que el ruido actúe localmente en el retículo, y los códigos topológicos poseen excitaciones localizadas, estos se convirtieron en seguida en el método preferido para proteger la información cuántica.

Dos ejemplos de códigos topológicos son el código de superficie y el código de color. El primero lo crearon Kitaev y mi compañero de IBM Sergey Bravyi, e incluye qubits de datos y auxiliares que se alternan en una red cuadrada bidimensional, como las casillas negras y blancas de un tablero de ajedrez.

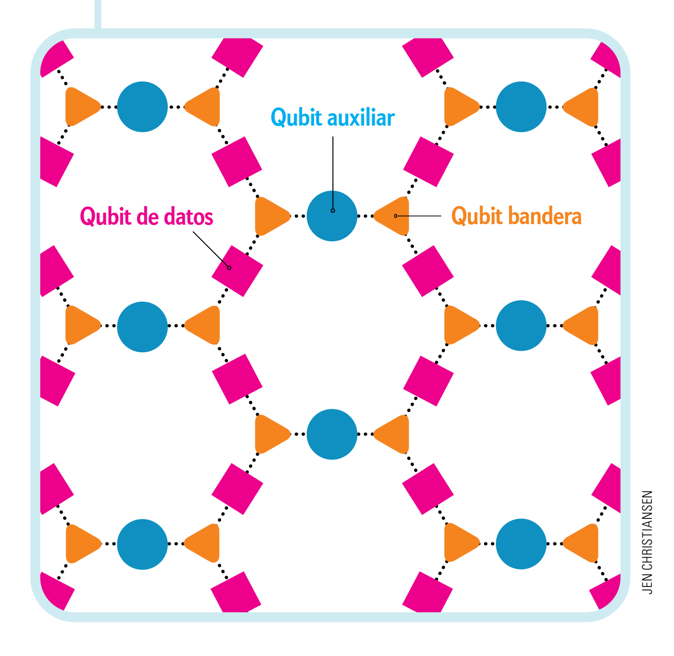


Del ajedrez a *Los colonos de Catán*

La teoría en la que se sustentan los códigos de superficie es sólida, pero, cuando empezamos a explorarlos en IBM, nos topamos con dificultades. Para entenderlas, hay que explicar un poco más cómo funcionan los qubits transmón.

Un qubit transmón se basa en corrientes oscilantes que atraviesan un circuito eléctrico con cables superconductores. Los valores 0 y 1 del qubit corresponden a distintas superposiciones de la carga eléctrica. Para realizar operaciones sobre el qubit, aplicamos pulsos de energía con una frecuencia concreta en el rango de las microondas. Como hay cierta flexibilidad a la hora de escoger esa frecuencia, que se fija al fabricar el qubit, utilizamos diferentes frecuencias para cada qubit, a fin de poder actuar sobre ellos de forma individual. El problema es que la frecuencia puede desviarse del valor previsto, o las frecuencias de los pulsos pueden solaparse, de modo que un pulso destinado a un qubit puede acabar cambiando el valor de uno de sus vecinos. La densa red de los códigos de superficie, donde cada qubit está conectado con otros cuatro, causaba demasiados conflictos de este tipo.

Nuestro equipo decidió resolver el problema conectando cada qubit a menos vecinos. El retículo resultante (que bautizamos como *heavy hex*) estaba formado por hexágonos, con lo que recordaba más al tablero del juego *Los colonos de Catán* que al del ajedrez. La buena noticia era que esa configuración reducía la tasa de conflictos. Pero, para que resultara útil, el equipo teórico de IBM debía desarrollar un nuevo código de corrección de errores. Este, denominado *heavy hexagon code*, combinaba aspectos del código de superficie y del de Bacon-Shor, otro código basado en un retículo. La baja conectividad entre qubits de nuestro código implicaba que algunos de ellos, los llamados «qubits bandera», debían actuar como intermediarios para identificar los errores que se produjeran. Eso complicaba ligeramente los circuitos y reducía un poco el umbral de la tasa de error, pero hemos comprobado que los beneficios son mayores que estos inconvenientes.



JEN CHRISTIANSEN

Aún queda otro problema por resolver. Los códigos basados en redes bidimensionales y que incluyen solo conexiones entre los vecinos más próximos presentan un gran sobrecoste computacional. Si queremos corregir más errores, hay que construir códigos más extensos, que emplean más qubits físicos para implementar un único qubit lógico. Esta configuración requiere un mayor soporte físico para representar la misma cantidad de datos, y eso hace más difícil construir qubits lo bastante buenos para salvar el umbral de error.

Los ingenieros cuánticos tenemos dos posibilidades. Una es resignarnos a que una arquitectura más simple conlleve un mayor sobrecoste (en forma de qubits y puertas adicionales), y centrarnos en comprender y optimizar los diversos factores que contribuyen a él. La otra vía es buscar mejores códigos. Por ejemplo, para codificar más qubits lógicos en un menor número de qubits físicos, quizá deberíamos permitir interacciones con qubits más distantes, o pasar de redes bidimensionales a otras en tres o más dimensiones. Nuestro equipo teórico está estudiando ambas opciones.

La importancia de la universalidad

Un ordenador cuántico útil debe ser capaz de llevar a cabo cualquier posible operación computacional. Pasar por alto este requisito es la raíz de muchos malentendidos y mensajes engañosos acerca de la computación cuántica. En pocas palabras, no todos los dispositivos que la gente llama «ordenadores» cuánticos son auténticos ordenadores: muchos se parecen más a calculadoras que solo pueden abordar ciertas tareas concretas.

Ignorar la necesidad de que la computación sea universal también genera ideas equivocadas con respecto a los qubits lógicos y a la corrección de errores cuánticos. Proteger la información almacenada en la memoria contra los errores es un buen comienzo, pero no es suficiente. Precisamos un conjunto universal de puertas cuánticas lo bastante rico para implementar cualquier puerta permitida por la mecánica cuántica. Además, hay que lograr que esas puertas sean robustas frente a los errores, y es ahí donde surgen las dificultades.

Las llamadas «puertas transversales» son fáciles de proteger contra los errores. Para entender estas puertas, consideremos dos niveles de descripción: el qubit lógico (la unidad de información protegida contra los errores) y los qubits físicos (los dispositivos físicos que, trabajando en concierto, codifican y protegen el qubit lógico). Para crear una puerta transversal protegida contra errores que actúe sobre un único qubit, hay que ejecutarla sobre todos los qubits físicos que codifican el qubit lógico. Y si queremos que la puerta actúe entre varios qubits lógicos (es decir, que tome varios qubits como entrada), hay que hacer que opere entre los correspondientes qubits físicos de los qubits lógicos. Podemos pensar en dos qubits lógicos como dos bloques A y B de qubits físicos. Para implementar una puerta lógica (es decir, protegida contra errores) transversal, debemos ejecutarla entre el qubit 1 del bloque A y el qubit 1 del bloque B, entre el qubit 2 del bloque A y el qubit 2 del bloque B, y así sucesivamente para todos los qubits de ambos bloques. Dado que solo interactúan los qubits correspondientes, las puertas transversales mantienen constante (y, por tanto, bajo control) el número de errores por bloque.

Si todas las puertas cuánticas fueran transversales, las cosas serían más sencillas. Pero un teorema fundamental establece que ningún código de corrección de errores puede llevar a cabo computación universal empleando únicamente puertas transversales. No se puede tener todo en la vida... ni en la corrección de errores cuánticos.

Y eso nos dice algo importante acerca de los ordenadores cuánticos. Si escucha que lo que hace especial a la computación cuántica es que hay superposición de estados y entrelazamiento, ¡cuidado! No todos los estados superpuestos o entrelazados son especiales. Algunos se implementan mediante un conjunto de puertas transversales denominado grupo de Clifford, y un ordenador clásico puede simular de manera eficiente cualquier cálculo cuántico que use solo puertas de Clifford. Lo que necesitamos son puertas que no pertenezcan a este grupo, las cuales no suelen ser transversales y son difíciles de simular con un ordenador clásico.

Siempre que la tasa de error de los qubits físicos se mantenga por debajo de cierto límite, es posible eliminar los errores más deprisa de lo que se acumulan

El mejor truco para implementar puertas que no sean de Clifford y estén protegidas del ruido se llama destilación de estados mágicos, y lo desarrollaron Kitaev y Bravyi. Es posible crear puertas que no sean de Clifford utilizando solo puertas de Clifford, siempre que tengamos a nuestra disposición un recurso especial: los estados mágicos. Estos, sin embargo, deben ser muy puros (es decir, han de tener muy pocos errores). Kitaev y Bravyi se percataron de que, en algunos casos, podemos partir de un conjunto de estados mágicos ruidosos y «destilarlos» para acabar con un número menor de estados mágicos más puros, empleando tan solo puertas de Clifford perfectas (suponemos que ya se han corregido sus errores), así como mediciones para detectar y subsanar los errores. Repitiendo muchas veces esa destilación, obtenemos un estado mágico puro a partir de múltiples estados con ruido.

Una vez que tenemos el estado mágico puro, podemos hacer que interactúe con un qubit de datos mediante un proceso llamado teleportación, que transforma el estado del qubit de datos en el nuevo estado que habría producido la puerta que no es de Clifford. Este proceso destruye el estado mágico.

La estrategia es inteligente, pero muy costosa. Para un código de superficie estándar, la destilación de estados mágicos supone el 99 por ciento de todos los cálculos. Está claro que necesitamos

métodos para optimizar o eludir la destilación de estados mágicos. Entretanto, podemos ver qué somos capaces de hacer con un ordenador cuántico ruidoso si recurrimos a la mitigación de errores. En lugar de intentar diseñar circuitos cuánticos para enmendar los errores computacionales en tiempo real (lo que requiere qubits adicionales), la mitigación de errores emplea un ordenador clásico para determinar la contribución del ruido a partir del resultado de los experimentos, a fin de cancelarlo. Este enfoque no precisa qubits adicionales, a costa de trabajar con más circuitos cuánticos e introducir más procesamiento clásico.

Suele decirse que lo que hace especial a la computación cuántica es que hay superposición y entrelazamiento, pero no todos los estados superpuestos o entrelazados son especiales

Por ejemplo, si logramos caracterizar el ruido del procesador cuántico o inferirlo a partir de un conjunto de circuitos ruidosos que puedan simularse de manera eficiente en un ordenador clásico, podremos usar esa información para aproximar la salida de un circuito cuántico ideal. Cabe pensar en ese circuito como una suma de circuitos ruidosos, cada uno con un peso relativo que calculamos a partir de lo que sabemos sobre el ruido. Otra opción es hacer funcionar nuestro circuito muchas veces, e ir variando el valor del ruido. Entonces tomamos los resultados, conectamos los puntos y extrapolamos el resultado que esperaríamos si el sistema estuviese libre de errores.

Esas técnicas tienen sus limitaciones. No son aplicables a todos los algoritmos, e incluso cuando lo son, su utilidad es limitada. Sin embargo, combinar la mitigación y la corrección de errores tiene efectos muy potentes. Nuestro equipo teórico ha demostrado que, si usamos corrección de errores para las puertas de Clifford y mitigación para las demás, podríamos simular circuitos cuánticos universales sin necesidad de destilar estados mágicos. Este resultado también serviría para lograr una ventaja respecto a los ordenadores clásicos empleando ordenadores cuánticos más pequeños. Según nuestros cálculos, esa combinación de mitigación y corrección de errores permite simular circuitos con un gran número de puertas que no son de Clifford, hasta 40 veces más de las que puede manejar un ordenador clásico.

A fin de avanzar y diseñar métodos más eficientes para lidiar con los errores, es necesaria una estrecha retroalimentación entre teoría y dispositivos. Los teóricos han de adaptar los circuitos cuánticos y los códigos de corrección de errores a las limitaciones que imponen las máquinas. Y los ingenieros deben diseñar sistemas que se adapten a los requisitos de los códigos de corrección de errores. El éxito de los ordenadores cuánticos depende de saber gestionar estas interacciones entre la teoría y la ingeniería.

Estoy orgullosa de haber contribuido a que la computación cuántica pase de ser un campo basado en demostraciones de laboratorio con uno o dos qubits a otro donde cualquiera puede acceder a través de la nube a sistemas cuánticos con decenas de qubits. Pero queda mucho por hacer. Para disfrutar de los beneficios de los ordenadores cuánticos, harán falta equipos que operen por debajo del umbral de error, códigos de corrección de errores que puedan reparar los fallos con el menor número posible de qubits y puertas adicionales, y mejores formas de combinar la corrección y la mitigación de errores. Debemos perseverar, porque aún no hemos acabado de escribir la historia de la computación cuántica.

Zaira Nazario trabaja en física cuántica teórica en el Centro de Investigación Watson de IBM, ubicado en el estado de Nueva York.



EN NUESTRO ARCHIVO

Procesamiento cuántico de la información. Antonio Acín en *IyC*, septiembre de 2006.

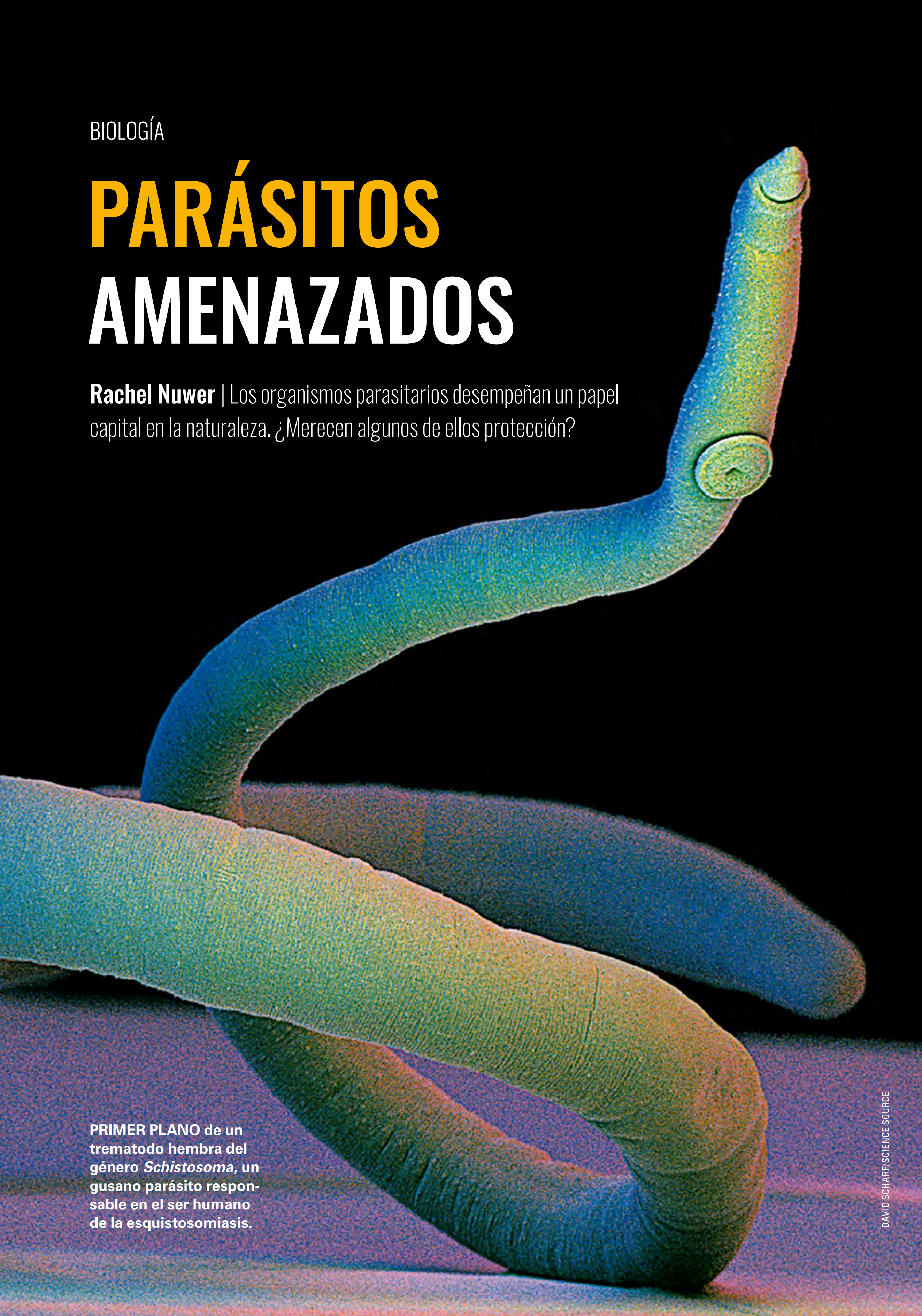
Los límites de la computación cuántica. Scott Aaronson en *IyC*, mayo de 2008.

Computación cuántica modular. Christopher R. Monroe, Robert J. Schoelkopf y Mikhail D. Lukin en *IyC*, julio de 2016.

BIOLOGÍA

PARÁSITOS AMENAZADOS

Rachel Nuwer | Los organismos parasitarios desempeñan un papel capital en la naturaleza. ¿Merecen algunos de ellos protección?



PRIMER PLANO de un trematodo hembra del género *Schistosoma*, un gusano parásito responsable en el ser humano de la esquistosomiasis.

DAVID SCHARF/SCIENCE SOURCE

Estaba preparando la cena, fileteando un trozo de bacalao, cuando apareció una pequeña mancha rosada en la inmaculada carne blanca del pescado. Al retirarla con la punta del cuchillo, me di cuenta de que algo no andaba bien. Lo que parecía una vena hinchada empezó a desenrollarse adquiriendo una delgada forma del tamaño de mi dedo meñique que... ¡se movía!

Como en una película de terror, observé, fascinada, cómo la criatura sinuosa se sacudía afligida, juzgué, por hallarse despojada de la protección de la carne del pescado. Antes de depositarla en el compostador, tomé unas cuantas fotos. Sabía exactamente a quién debía enviárselas para que me ayudara a identificarla: Chelsea Wood, ecóloga experta en parásitos de la Universidad de Washington —y, tal vez, la única persona en el mundo que escogería la palabra *hermoso* para describir a los gusanos hematófagos.

La respuesta de Wood llegó a la mañana siguiente: un gusano de la familia *Anisakidae*, contestó, probablemente *Anisakis simplex* o *Pseudoterranova decipiens*, nematodos comunes cuya fase larvaria se desarrolla en los peces o calamares. Luego, Wood me felicitó: «¿Hay mejor manera de iniciar el nuevo año que toparse con un gusano vivito y coleando en tu bacalao fileteado?».

Habida cuenta de que Wood no había obviado el dolor abdominal, los vómitos, la diarrea y las heces sanguinolentas que habría manifestado de haber logrado aquel gusano adherirse a mi esófago, estómago o intestino, la enhorabuena me pareció fuera de lugar. Con su talante entusiasta, me explicó por qué mi descubrimiento era una buena noticia: los hospedadores habituales de este parásito son ballenas, delfines, focas y leones marinos, animales situados en la parte alta de la red trófica. «La presencia de estos gusanos en el pescado es, de hecho, un indicio de la salud del ecosistema del que procede y de la existencia de una población cercana sana de mamíferos marinos», aclaró Wood. «¡Alégrate de este zigzagueante portador de buenas nuevas!»

Los parásitos son organismos que conviven en una relación íntima, duradera y costosa con sus hospedadores. Se calcula que entre el 40 y el 50 por ciento de todas las especies animales se clasifican en este grupo. Casi cualquiera de los organismos de vida libre de nuestro planeta posee al menos un parásito que ha evolucionado de forma específica para explotarlo. La definición más amplia de *parásito* abarca a patógenos como bacterias, virus, hongos y protozoos. Pero muchos parasitólogos, como Wood, se centran en los metazoos: animales pluricelulares que comprenden centenares de miles de especies, entre ellas unos 300.000 tipos de vermes que parasitan solo a los vertebrados.

Los parásitos metazoarios son tan diversos como abundantes. Suman 15 filos que abarcan desde una masa amorfa de apenas unas pocas células hasta tenias de casi 40 metros de largo, plácidamente enrolladas en el intestino de una ballena. Existen especies tan alejadas filogenéticamente entre sí como lo están el ser humano y los insectos o las medusas. Viven en cada uno de los hábitats de todos los continentes y en cualquier orificio, órgano o parte del cuerpo de sus hospedadores. Son, además, unos de los especialistas más extremos del mundo, con ciclos biológicos sumamente intrincados que, a veces, requieren la participación de hasta cinco hospedadores distintos para completar su desarrollo de huevo a larva y a adulto. «Es sencillamente un hermoso reflejo de la complejidad de la naturaleza y su interconectividad», recalca Wood.

Sin embargo, pocos biólogos (y apenas nadie más) tienen algo más que un vago conocimiento de los parásitos, más allá de los vermes que causan molestias y daños a los humanos, como las tenias, los oxiuros y los anquilostomas. Por ello, casi todo el saber actual sobre los parásitos emana del estudio de cómo eliminarlos. «El alcance de nuestra ignorancia no tiene perdón», se lamenta Wood.

Esta situación está empezando a cambiar. «La ecología de las enfermedades y los parásitos

EN SÍNTESIS

Hasta hace poco existía un escaso conocimiento sobre los animales parásitos, más allá de los que dañan a los humanos, como las tenias o los anisakis.

Esta situación está empezando a cambiar, y cada vez hay más pruebas de que estos organismos desempeñan una función vital en los ecosistemas. Sin embargo, igual que las especies más conocidas, sufren la amenaza del cambio climático, la destrucción del hábitat o la contaminación.

Aunque la conservación de los parásitos no es fácil de defender, numerosos científicos insisten en la importancia de protegerlos.


JOVELLE TAMAYO

LA ECÓLOGA experta en parásitos Chelsea Wood retratada entre los ejemplares de la colección ictiológica de la Universidad de Washington perteneciente al Museo de Historia Natural y Cultura de Burke.

representa en la actualidad el campo de mayor crecimiento de las ciencias ecológicas», afirma Skylar Hopkins, ecóloga especializada en parásitos de la Universidad Estatal de Carolina del Norte. Con la reciente irrupción de investigadores que inician la carrera, «contamos con una masa crítica de científicos y profesionales». A medida que el campo se expande, están surgiendo más indicios de que estos organismos desempeñan una función capital en la naturaleza. Un nuevo estudio ha revelado que los parásitos son responsables del 75 por ciento de las relaciones en las redes tróficas, mientras que otro ha puesto de manifiesto que nos proveen de valiosos servicios ecosistémicos. Entre ellos figura el control de las plagas, cuyo valor se calcula que asciende a miles de millones de euros.

Al igual que los depredadores, los parásitos ejercen sobre otros organismos del ecosistema efectos que lo configuran casi todo, desde el ciclo de nutrientes hasta los tipos de plantas que allí crecen o la abundancia de depredadores en lo alto de la red trófica. En otras palabras, los parásitos «desempeñan un papel crucial que hasta ahora sencillamente se había ignorado», señala Armand Kuris, experto en ecología de parásitos de la Universidad de California en Santa Bárbara. «Su control vertical sobre las poblaciones de organismos funciona de forma distinta a la depredación; es más lento, pero su efecto puede ser igual de colosal.»

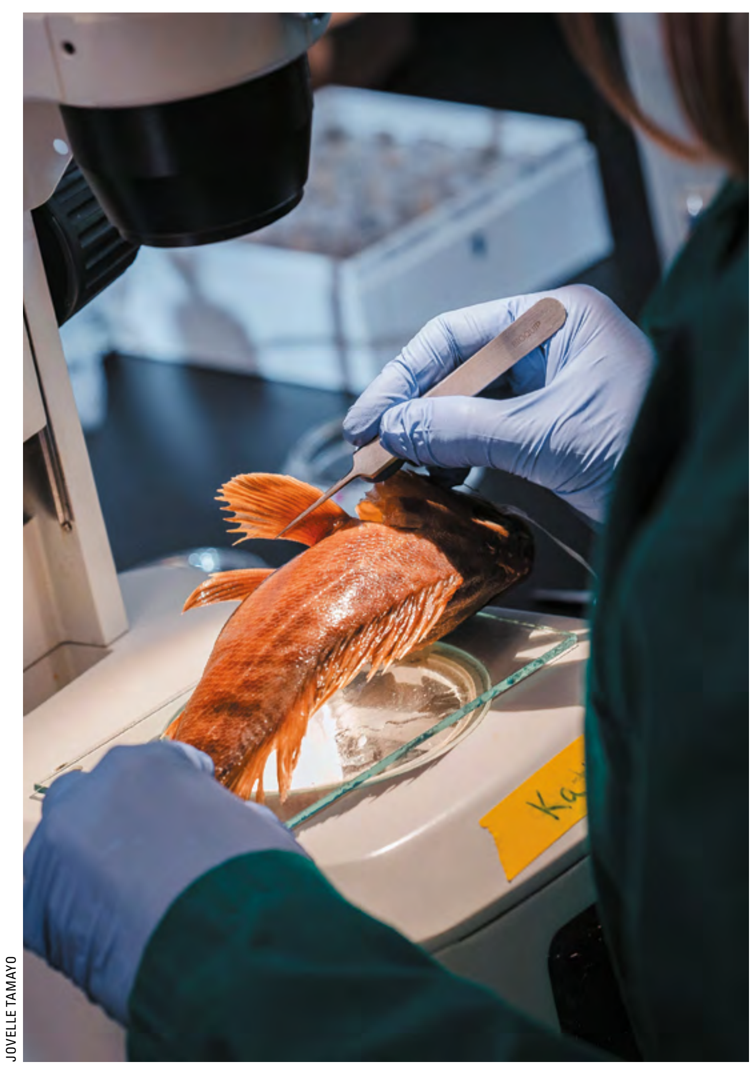
Junto con el descubrimiento del papel decisivo de los parásitos, los estudios pioneros realizados por Woods y otros investigadores están empezando a desvelar que muchos de ellos se hallan en problemas. Lidian con las mismas amenazas que las especies más conocidas: el cambio climático, la destrucción de hábitats o la contaminación, entre otras. Dado que su destino está unido al de sus hospedadores —muchos de los cuales se hallan también en declive—, a menudo su vulnerabilidad se multiplica por dos, sobre todo si son especialistas que parasitan a una sola especie. «Cada especie en peligro de extinción en la que podamos pensar posee parásitos que dependen de ella», explica Hopkins. «Si esta desaparece, sus parásitos también pueden hacerlo.»

Sin embargo, su conservación no es un tema fácil de vender. Salvar a ciertos parásitos —y, por ende, preservar su función en la naturaleza— dependerá de convencer a las autoridades responsables, la población general y una mayor comunidad científica de que vale la pena protegerlos.

No todos son malvados

Si preguntamos a un experto en ecología de parásitos cómo se interesó por este campo, lo más seguro es que confiese que por accidente. Wood creció en Long Island, en el estado de Nueva York, y soñaba en convertirse en bióloga marina. Fantaseaba con una carrera nadando entre delfines. Sin embargo, en la facultad no ofrecían oportunidades para la investigación en biología marina. Lo más parecido que pudo hallar para sumergirse en el agua fueron unas prácticas para recolectar caracoles marinos infestados por trematodos en Nuevo Hampshire y Maine. Los parásitos no entraban en sus planes «de ninguna de las maneras», recalca.

La mentalidad de Wood dio un giro lento y luego radical. Empezó a descubrir en los parásitos un mundo oculto que funcionaba en paralelo al de las especies de vida libre. Las asignaturas que había cursado en la carrera apenas habían aludido a estos animales. «Es posible graduarse en biología y no haber aprendido nunca nada sobre parásitos», afirma. Y menciona un estudio de 2011 que concluyó que el 72 por ciento de 77 manuales de biología de la conservación o bien no los mencionaban en absoluto, o solo los retrataban como amenazas de los hospedadores en los que se alojan. A medida que Wood iba aprendiendo más sobre ellos, sintió como si estuviese despertando del mundo de Matrix: de repente podía atisbar una capa oculta de complejidad y conexión en cada pieza del puzle de la vida. También advirtió una oportunidad para la investigación científica. Menos del 10 por ciento de las especies de parásitos han recibido siquiera un nombre y muchos menos han sido estudiados en detalle.


JOVELLE TAMAYO

EXAMEN bajo un estereomicroscopio para detectar ectoparásitos en la piel de un pez conservado.

Wood dirige en la actualidad su propio laboratorio de parasitología en la Universidad de Washington, que describe como «una fábrica de disección abierta las 24 horas del día». Su equipo de técnicas, estudiantes universitarias e investigadoras posdoctorales son todo mujeres. «No me explico por qué a las mujeres les gustan tanto los parásitos», se pregunta. «No seleccioné a las personas por su sexo, sino a las mejores.»

El laboratorio de Wood aborda una única pregunta desde distintos ángulos: ¿cómo repercute en los parásitos la acción humana sobre los ecosistemas? Un proyecto se dedica a comparar la transmisión parasitaria en los arrecifes de coral sometidos a distintos niveles de impacto humano. Otro está examinando cómo influye la ecología de los ríos, lagos y estanques de los que se obtiene agua sobre la incidencia de la esquistosomiasis en las poblaciones humanas de Áfri-

ca Occidental. Con todo, lo que más apasiona a Wood es investigar cómo han cambiado los parásitos a lo largo del tiempo.

Se tiende a afirmar que las poblaciones de parásitos están creciendo sin control

Entender el pasado revela a los ecólogos lo que era normal antes de que el ser humano empezara a inmiscuirse en los ecosistemas, y a qué condiciones iniciales deben aspirar en su labor de conservación o restauración. A diferencia de otros animales bien conocidos y carismáticos, como los elefantes o los tigres, los parásitos silvestres adolecen de un vacío de datos: se desconoce por completo cómo han variado sus poblaciones, si es que lo han hecho, a lo largo del tiempo. No obstante, Wood ha detectado que tanto los científicos como los medios tienden a promocionar la idea de que las poblaciones de parásitos están creciendo fuera de control, avivadas por la presión humana sobre el entorno.

Wood califica de apocalíptico ese relato. Sin ir más lejos, en un artículo de 2015 publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, los autores sostenían que, dado que «la diversidad de hospedadores frena la abundancia de parásitos [...], los declives antropogénicos en la biodiversidad pueden incrementar las enfermedades humanas y de la fauna silvestre». Sin embargo, esta afirmación se basa en la suposición de que los parásitos son siempre los malos de la película. «El pronóstico instintivo es que con la degradación ambiental aumenten los parásitos, ya que se los ha considerado hasta ahora como un estrés adicional sobre el ecosistema», explica Kevin Lafferty, especialista en ecología de las enfermedades del Servicio Geológico de Estados Unidos. Este pronóstico encierra, advierte, «una pasmosa ignorancia» sobre la ecología de los parásitos en general.

Wood concuerda en que la historia es probablemente más compleja. Como cualquier fauna silvestre enfrentada a un cambio ambiental, conjetura que a lo largo del tiempo habría algunos parásitos ganadores y otros perdedores. La única manera de poner a prueba esta hipótesis sería comparar las tasas actuales de parasitismo con las del pasado.

Durante casi una década, Wood sopesó varios recursos poco convencionales que pudieran contribuir a llenar el vacío de datos históricos. Al final, halló una puerta al pasado en un práctico e insospechado lugar: la colección ictiológica de la Universidad de Washington en el Museo de Historia Natural y Cultura de Burke, ubicado a un edificio de distancia de su despacho. Esta vulgar sala del sótano conserva los restos de unos 13 millones de ejemplares marinos suspendidos en 40.000 frascos con etanol. Es la mayor colección de peces de América del Norte. Pero la cantidad de seres escamosos aquí preservados está sobrepasada con creces por la de los parásitos, decenas de millones de los cuales están adheridos a la piel, las branquias, los músculos y los intestinos de sus hospedadores. Los peces son «cápsulas del tiempo sobre los parásitos», explica Wood. Lo único que necesitaba la experta era asomarse a su interior.

Katherine Maslenikov, la directora de la colección ictiológica del museo, se mostró vacilante cuando Wood la abordó por primera vez con su idea. Pero más tarde se percató de que era una oportunidad para cumplir con la misión del museo de contribuir a estudios científicos innovadores. Como resume Maslenikov, «no es un almacén de seres muertos. Una colección está destinada a ser usada».

Ecología histórica

Katie Leslie está revisando tiras de intestino de una lubina rayada atlántica muerta hace 41 años. Hasta ahora Leslie, técnica de investigación en el laboratorio de Wood, ha hallado tan solo los restos del último festín del animal. Esta especie suele albergar muchos gusanos, pero, de forma inusitada, el ejemplar que examina carece de ellos. Hasta que un día se la oye exclamar: «Oh, sí, ¡espera! ¡Aquí hay un acantocéfalo!».

Bajo el microscopio surge el primer parásito del día, un acantocéfalo. Leslie logra añadir al cómputo siete parásitos más, incluidos platelmintos y nematodos. Luego, con cuidado, coloca de nuevo el pez dentro del frasco, junto con su vial de órganos etiquetado con esmero, antes de echar mano del siguiente.

Para iniciar la investigación sobre los parásitos ganadores y perdedores, Wood escogió de la colección ocho especies de peces habituales


JOVELLE TAMAYO

PARA DILUCIDAR si las poblaciones de parásitos han cambiado a lo largo del tiempo, el laboratorio de Wood disecciona ejemplares de abadejo de Alaska de entre 4 y 116 años de antigüedad en busca de gusanos y artrópodos parasitarios.

en el estrecho de Puget. Maslenikov la ayudó a identificar hasta 15 ejemplares por especie y decenio, desde una fecha tan remota como la década de 1880. En el laboratorio, cada pez es sometido a un examen minucioso, por dentro y por fuera, para localizar primero piojos marinos adheridos a la piel del animal y, luego, gusanos parasitarios en los órganos y las branquias. Desde el punto de vista técnico, el método, admite Wood, es «como golpear una piedra contra otra».

Encontrar los parásitos es tan solo el primer paso. Los vermes pueden ser sumamente difíciles de distinguir, con diferencias visuales que se ciñen al número de espinas o ganchos diminutos situados en un apéndice microscópico. La identificación de la especie es, por tanto, un ejercicio de paciencia y meticulosa pericia taxonómica. «Nuestro trabajo realza el valor de la taxonomía morfológica», defiende Rachel Welicky, antigua investigadora posdoctoral en el laboratorio de Wood y ahora profesora en la

Universidad Neumann de Pensilvania. «Se está convirtiendo en una forma de arte en aras de desaparecer.»

En julio de 2021, el laboratorio de Wood publicó en *Frontiers in Ecology and the Environment* su primer análisis de lenguados ingleses capturados entre 1930 y 2019. En más de 100 ejemplares, se identificaron casi 2500 parásitos pertenecientes a al menos 23 taxones, de los cuales 12 eran lo bastante prevalentes como para examinar su tendencia poblacional a lo largo del tiempo. De estos 12, nueve no habían variado en abundancia a lo largo de las décadas; dos, un trematodo y un acantocéfalo, habían disminuido; y un tercero, otro trematodo, había aumentado. En otro estudio publicado en 2018 en *Journal of Applied Ecology*, basado en el mismo análisis de los lenguados ingleses, el equipo también describió que un nematodo de la especie *Clavinema mariae* (un esquistosoma que provoca desagradables lesiones en la piel de su hospedador) había multiplicado su abundancia ocho veces a lo largo de 86 años.

De acuerdo con Lafferty, que no estuvo implicado en la investigación, estos resultados «otorgan un nuevo valor a los millones de peces preservados en las estanterías de los museos de todo el mundo». Los hallazgos en sí son notables, prosigue, porque aportan información importante sobre de las diferencias en la respuesta de los parásitos a los cambios ambientales. Los identificados en los lenguados ingleses se han mostrado sorprendentemente estables a lo largo del tiempo. Pero aquellos que sí sufrieron variaciones no siempre aumentaron. «Al igual que los organismos de vida libre, algunas especies de parásito se las apañan bien en situaciones de estrés, mientras que otras no», indica Lafferty. Wood y sus colaboradores están preparando otro artículo con datos aún más robustos que demuestran la hipótesis de «los ganadores y los perdedores».

Además de su dedicación metódica a los ejemplares museísticos, el equipo se está valiendo también de otros recursos. Si bien para cualquier especie de parásito son pocas las series de datos existentes a largo plazo, hay estudios excepcionales que documentan la abundancia de parasitismo en un lugar y momento concretos. En un artículo de 2020 en *Global Change Biology*, Wood y su grupo resumieron estos resultados para dos tipos de parásito frecuentes en el pescado crudo que suele emplearse en el *sushi* y el ceviche. Hallaron que uno de los gusanos es tan prevalente hoy en día como lo fue en el pasado, mientras que el otro ha experimentado un increíble aumento de 283 veces desde la década de 1970.

El *sushi* parasitado puede provocar un molesto cuadro de vómitos y diarrea a la persona que lo ingiere, pero lo que le preocupa a Wood son los mamíferos marinos, el objetivo deseado por los gusanos. Por lo general, un único verme no extrae mucha energía de su hospedador. Pero si el número de gusanos se dispara, pueden suponer un problema para los mamíferos marinos, en especial en las poblaciones que ya están asediadas por otros factores de estrés. El grupo amenazado de orcas residentes en el estrecho de Puget, por ejemplo, está expuesto a la contaminación, el ruido de las embarcaciones y la escasez de salmón real como sustento. En 2018, una raquítica cría de orca apareció en el estrecho. Los esfuerzos de las autoridades por salvarla fueron en vano y, antes de que muriera, los científicos descubrieron que sus heces estaban llenas de huevos de un parásito de la misma familia identificada en el *sushi* del estudio de Wood.

Este hallazgo no demuestra que los parásitos estuvieran implicados en la muerte de la cría, aunque abre la puerta a la posibilidad de que los vermes dificultaran la vida de una población ya acosada por otros problemas, afirma Wood. Para profundizar sobre ello, Natalie Mastick, doctoranda del laboratorio de Wood, está empleando varios métodos, como la recogida y análisis de excrementos de ballenas (localizados por perros adiestrados apostados en barcos). A partir de ellos, determina las hormonas, la dieta y la carga de parásitos para dilucidar si las ballenas actuales están enfrentándose a una mayor amenaza de parasitismo intestinal respecto al pasado. «Si los gusanos resultan ser este perverso factor estresante que ignorábamos, por lo menos es un mal tratable», señala Mastick. Los gestores de la fauna silvestre pueden introducir antihelmínticos en los salmones con los que alimentan a los mamíferos marinos parasitados («al igual que escondes el comprimido de tu perro en una nuez de mantequilla de cacahuete», precisa Wood) o emplear dardos para administrar los fármacos a distancia.

Además de la posible repercusión sobre la salud humana y de la vida silvestre, los picos en las poblaciones de parásitos pueden perjudicar a ciertos sectores. El estrecho de Puget, sin ir

más lejos, es famoso por la producción de ostras del Pacífico y sus nacaradas e inmaculadas conchas. Pero en 2017, un colaborador de Wood depositó en su mesa una de ellas, deteriorada por tortuosos canales y antiestéticas manchas oscuras, signos de una plaga del género *Polydora* que perfora las conchas. Aunque los parásitos en sí no son peligrosos para el consumo humano, forman ampollas repletas de sus heces y lodo en la concha de las ostras, en las que, además, dejan cicatrices por su voraz afición a excavar túneles. No es algo que los comensales deseen contemplar en sus platos. Desde la década de 1860, los brotes de *Polydora* han devastado los sectores ostrícolas en Australia, Hawái y la costa este de los EE.UU., pero el estado de Washington (el mayor productor de bivalvos cultivados en el país) había logrado zafarse por largo tiempo. En marzo de 2020, sin embargo, Julieta Martinelli, una de las posdoctorandas de Wood, y sus colaboradores anunciaron en la revista *Scientific Reports* que una infame especie, *Polydora websteri*, había invadido el estrecho de Puget.

Martinelli está investigando la ecología del parásito con la esperanza de dilucidar estrategias que ayuden a los cultivadores de ostras a tratar y contener la plaga. Además, ella y Wood están intentando desentrañar la historia de *Polydora* y otros poliquetos perforadores de conchas. Una introducción accidental parece ser la respuesta más obvia, pero la realidad podría ser más compleja. Martinelli está volcando su atención en los depósitos arqueológicos de ostras (en esencia, pilas de conchas que revelan antiguos atracones a base de estos bivalvos) para averiguar el origen de *Polydora* en el Noroeste del Pacífico. Ha logrado así confirmar que unas conchas de la ostra autóctona *Olympia* de 1000 años de antigüedad, recuperadas de los depósitos antiguos de la tribu S'Klallam de Jamestown, portan signos de algún tipo de gusano perforador. Martinelli supone que se trata de una especie distinta, aunque también podría ser que un número reducido de gusanos *Polydora* estuviera agazapado a la espera de medrar hoy en día gracias a algún desencadenante ambiental aún desconocido.

Martinelli prevé excavar depósitos de ostras más recientes para averiguar si puede establecer cuándo se produjo la introducción del parásito en las poblaciones locales de bivalvos. «El asunto peliagudo con los estudios paleontológicos es que nunca obtendremos la respuesta definitiva, aunque disponemos de rastros del pasado equiparables a los del presente», señala.

Salvemos los parásitos

El aumento de los parásitos sigue acaparando casi toda la atención, razón por la cual Wood está sensibilizada con su disminución y sus implicaciones para los humanos y la fauna silvestre. Hay que celebrar algunos esfuerzos, como la erradicación del gusano de Guinea, un parásito con forma de espagueti que crece hasta alcanzar los 7,5 metros de largo en el aparato digestivo de la persona infestada para migrar luego a la piel y emerger al final a través de ella. Pero para los parásitos que no afectan al ser humano (la gran mayoría de las especies), algunas de las pérdidas son inquietantes. Un artículo de 2017 en *Science Advances* calculó que hasta el 30 por ciento de los gusanos parásitos podrían extinguirse en las próximas décadas a causa del cambio climático y otras presiones, y tan solo estamos empezando a vislumbrar las consecuencias de tal abrumadora pérdida de biodiversidad.

Hasta el 30 por ciento de los gusanos parásitos podrían desaparecer pronto

Consideremos, por ejemplo, el fenómeno del «control mental» parasitario que sucede en muchas especies. «Los parásitos desvían la energía desde niveles tróficos inferiores hacia los superiores al transformar a las presas en seres incapacitados», explica Wood. *Euhaplorchis californiensis* es un platelminto trematodo que, en su estado larvario, se asemeja a un espermatozoide, con una gran cabeza y una larga cola. El ciclo biológico de este platelminto se inicia en un caracol, prosigue en una sardinilla chococo y alcanza su destino final en el intestino de un ave acuática depredadora, como una garza o garcilla. Los chococos suelen pasar el día escondiéndose, todo lo contrario a las intenciones del parásito. Así que el platelminto forma quistes en el cerebro de su hospedador, lo que provoca que el desafortunado pez chapotee cerca de la superficie del agua emitiendo destellos con su

vientre brillante que sirven de señuelo para las aves. Los científicos han demostrado que la probabilidad de los chococos infestados de ser devorados por un ave es de 10 a 30 veces mayor que la de los ejemplares no infestados. En conjunto, los trematodos convierten a un porcentaje considerable de las poblaciones de chococos en más fácilmente disponibles como alimento de las aves, lo que sufraga de forma efectiva la dieta de estos depredadores. Si algunas especies de parásitos están en declive o incluso desaparecen, es posible que «sea más difícil conservar a los depredadores», aduce Wood.

Asimismo, en Japón, un gusano nematomorfo de 38 centímetros induce a los grillos infestados a sumergirse en riachuelos en los que los gusanos adultos emergen de sus hospedadores para participar en una orgía parasitaria. Mientras tanto, los condenados grillos se convierten en alimento del amenazado salvelino de manchas blancas, lo cual aporta hasta el 60 por ciento de las calorías que precisa el pez. No solo el nematomorfo contribuye a sustentar a una especie amenazada, sino que al aliviar la presión sobre otras especies de invertebrados de los que se alimentan los peces, también modifican la ecología general de los riachuelos.

A medida que los científicos van desgranando el papel de los parásitos en los ecosistemas, un pequeño pero creciente grupo está empezando a sopesar seriamente la necesidad de abogar por la conservación de unos parásitos específicos. En octubre de 2020, Colin Carlson, ecólogo experto en parásitos de la Universidad de Georgetown, junto con Wood, Hopkins y otros nueve investigadores, publicaron un plan de 12 puntos para la conservación de parásitos durante la próxima década. Para empezar, manifestaron en la revista *Biological Conservation* que no es posible conservar lo que no sabemos que existe. Desafiaron a la comunidad científica a arrojar algo de luz a la diversidad parasitaria instándola a describir más del 50 por ciento de las especies de parásitos hasta 2030. «En pocas palabras, apenas hemos rozado la superficie», afirma Hopkins.

Una vez vayan llegando las descripciones y los datos de la ecología y el ciclo de vida de cada especie, los autores apuntan a que los parásitos que precisan de medidas de conservación se podrán identificar e integrar luego, de forma bastante sencilla, en los programas actuales de protección de especies. La conservación de parásitos puede simplemente sumarse a los esfuerzos existentes para salvar a las especies de vida libre en problemas. Y los parásitos amenazados pueden añadirse a los diversos inventarios destinados a registrar y proteger las plantas y los animales en peligro. Tan solo un parásito animal, el piojo chupador de cerdo pigmeo, está hoy en día incluido en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

Hopkins, Wood y otros como ellos son conscientes de que los parásitos adolecen de un serio problema de imagen, pero se muestran esperanzados de que puedan renovarla. Comparan el estado de conservación de los parásitos al lugar que ocupaba hace tan solo unas pocas décadas la conservación de los depredadores. En esos tiempos, muchos investigadores y la población general consideraban a los osos, los lobos y otros carnívoros como perjudiciales para el ambiente y peligrosos para el ser humano y el ganado. Estas suposiciones no solo demostraron ser falsas, sino también dañinas. Los científicos saben ahora que las especies de depredadores constituyen una piedra angular de la que dependen ecosistemas enteros. Su ausencia puede desencadenar una cascada de consecuencias negativas, desde brotes de enfermedades a interrupciones del ciclo de los nutrientes o a transformación del hábitat. Con la importancia de los depredadores otorgada por los científicos llegó también el beneplácito del público.

«Mi esperanza es que la gente esté dispuesta a ver más allá de la caja negra en la que hemos encerrado a los parásitos», apunta Wood. «No son esa amenaza monolítica.»

Rachel Nuwer es periodista científica. Escribe en *Scientific American, New York Times* y *National Geographic*, entre otras publicaciones.



EN NUESTRO ARCHIVO

Taenia solium: un parásito cosmopolita. Ana Flisser, Laura Vargas-Parada y Juan Pedro Laclette en *IyC*, mayo de 2006.

Esquistosomas. Patrick Skelly en *IyC*, agosto de 2008.



UNA MUJER junto a un ceibo, árbol sagrado de los ashánincas.

ANDRÉ DIB

ANTROPOLOGÍA

APIWTXA, MAESTROS DE LA SOSTENIBILIDAD

Carolina Schneider Comandulli, junto con la Asociación Apiwtxa | Una comunidad indígena de la Amazonia enseña al resto del mundo a convivir en armonía con la naturaleza

El pasado mes de julio un presentimiento impulsó a los ashánincas, un pueblo indígena del extremo occidental de la Amazonia, a emprender una expedición tradicional. Presagiando que podría ser su última oportunidad de gozar de paz y sosiego, más de doscientos lugareños de Sawawo y Apiwtxa, dos aldeas enclavadas a orillas del río Amonia (la primera en la margen peruana y la otra en la brasileña), botaron sus barcas con rumbo a las cabeceras fluviales, en lo hondo de la selva. Era la estación seca, cuando las aguas bajan claras, los niños pueden chapotear a placer y el cielo nocturno reluce de estrellas. Allí, emulando a sus ancestros, pasaron una semana dedicados a la caza, la pesca y el relato de historias, empapándose de la belleza y la serenidad que ofrecen esos prístinos parajes.

Un mes después sus temores se confirmaron: había arrancado la construcción de una carretera promovida por empresas madereras peruanas, de la que habían tenido noticia meses atrás. La maquinaria estaba ya en la linde de la selva, dispuesta a abrir una pista ilegal hasta el río Amonia. Con ese acceso, los madereros aprovecharían el curso del río para adentrarse en la selva y talar caobos (*Swietenia* sp.), cedros (*Cedrela* sp.) y otros árboles. Las aves y demás fauna que los operarios no cazasen para comer huirían por el ruido de las motosierras. Los indígenas se enfrentarían a un grave peligro, tanto por los encuentros violentos con los intrusos como por los microbios foráneos, contra los que los habitantes de la selva tienen poca inmunidad. Los narcotraficantes deforestarían grandes extensiones para plantar coca e intentarían reclutar a los jóvenes de la zona como repartidores de droga. La carretera traería, en una palabra, la devastación.

Esta tierra fronteriza entre Brasil y Perú, donde la selva amazónica se eleva suavemente hacia el pie de los Andes, acoge una gran riqueza biológica y cultural. Es el hábitat del jaguar (*Panthera onca*) y de los monos lanudos (género *Lagothrix*), además del hogar de varios grupos indígenas. La zona protegida comprende dos parques nacionales, dos reservas de indígenas en aislamiento voluntario y más de 26 territorios indígenas. La ciudad más cercana es Pucallpa, en Perú, situada a más de 200 kilómetros de espesa jungla, casi impenetrable; en el lado brasileño, el pueblo de Marechal Thaumaturgo, ubicado a orillas del Amonia, queda a tres horas de barca de la aldea de Apiwtxa, pero desde allí se puede volar en avioneta a la segunda ciudad del estado de Acre, Cruzeiro do Sul.

A pesar de ser tan remota, hace siglos que la región está asediada por la codicia de los colonos. En respuesta, los ashánincas entablaron alianzas contra los invasores o buscaron refugio en la

EN SÍNTESIS

Hace décadas que la Amazonia sufre el expolio de la industria maderera y minera, los latifundios agropecuarios y el narcotráfico, actividades muchas veces impulsadas por intereses lejanos.

Algunas tribus de la gran cuenca se han organizado en defensa de sus tierras ancestrales y de su derecho a conservarlas y explotarlas de modo sostenible.

Los ashánincas han emprendido iniciativas ejemplares con las que han logrado difundir la problemática que afrontan, su cultura y conocimientos tradicionales y, en definitiva, el mensaje de respeto por la naturaleza que propugnan.



FUENTES: DAVID S. SALISBURY, STEPHANIE A. SPERA, ELSPETH COLLARD, ANNA FRISBIE, M. R. PLACE, YUNUEN REYGADAS LANGARICA Y ELIZABETH ZIZZAMIA, EQUIPO DE ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS FRONTERAS AMAZÓNICAS, 2021; «ATLAS DE LAS CARRETERAS PROPUESTAS EN LA ZONA TRANSFRONTERIZA DE UCAYALI, PERÚ-ACRE, BRASIL», POR SPATIAL ANALYSIS LAB, UNIVERSIDAD DE RICHMOND (*REFERENCIA DEL MAPA*); MAPPING SPECIALISTS (*ILUSTRACIÓN DEL MAPA*) MAPA ELABORADO POR MAPPING SPECIALISTS.



ANDRÉ DIB



PISTA FORESTAL abierta en la selva por madereros peruanos (*izquierda*) para llegar al río Amonia, en agosto de 2021. Temiendo el expolio de la región, los asháninca y sus aliados detuvieron a los madereros interponiendo sus propios cuerpos. Poco más tarde montaron un puesto de vigilancia junto a la carretera ilegal (*arriba*), para defender la riqueza natural de la región ante futuras agresiones y pillajes.

profundidad de la selva. Los avances técnicos han facilitado mucho desde los años ochenta la tala mecánica con vistas a la explotación maderera, la cría de ganado, la agricultura industrial y el cultivo y tráfico de estupefacientes.

Los asháninca de Apiwtxa supieron adaptarse y responder a esa presión con tácticas más elaboradas, para las cuales se coaligaron con otros pueblos indígenas y con la sociedad en general. Pero lo más notable es que han diseñado una estrategia de supervivencia a largo plazo: han ideado y puesto en práctica un estilo de vida sostenible, autosuficiente y gozoso, protegido por el empoderamiento cultural, la espiritualidad indígena y la resistencia a las invasiones. El jefe apiwtxa Antônio Piyãko proclamó en la reunión de julio: «Vivimos en la Amazonia. Si no la cuidamos, desaparecerá. Tenemos derecho a seguir cuidando de esta tierra e impedir que la destruyan quienes no tienen lugar en ella».

Junto con varias ONG regionales, los apiwtxa habían colaborado con los habitantes de Sawawo, primeros en el frente de invasión, para hacer frente a los madereros. Cuando supieron que habían llegado, varios miembros del comité de vigilancia de Sawawo remontaron el río Amonia hasta que se toparon, al cabo de dos horas y media, con dos tractores forestales. Cargados de gente, alimentos, carburante y herramientas para levantar un aserradero, los vehículos habían vadeado el río y se habían adentrado en territorio asháninca, en Perú. Los defensores fotografia-

ron los destrozos, hablaron con los madereros y volvieron a la aldea, donde tienen conexión a Internet. Desde allí denunciaron la intrusión a las autoridades peruanas, a través de una entidad indígena local, y pidieron la inspección de un funcionario de medioambiente. Mostraron las fotos a los apiwtxa y otros aliados y acamparon en la zona de la invasión, a la espera de refuerzos.

Al poco acudieron los miembros de la comunidad apiwtxa, en barca, y nueve días después se sumaron colaboradores de tres ONG regionales, que marcharon a pie. Esa noche vieron llegar otros dos tractores con material. Más de veinte personas, encabezadas por una mujer con su bebé en brazos, se plantaron ante los tractores para impedir que cruzaran el Amonia. Con fama de aguerridos, los asháninca confiscaron las llaves a los conductores en un santiamén, que quedaron atónitos.

El funcionario llegó el día siguiente. Tras hacer una comprobación somera de los daños ambientales, exigió a los asháninca que le entregasen las llaves de los tractores. De todas formas, los sawawo mantuvieron el campamento durante meses para evitar nuevas incursiones y las ONG avisaron a la prensa.

Las madereras acabaron dando media vuelta. La resistencia de los indígenas, tenaz pero pacífica, junto con la presión de los medios nacionales e internacionales, las disuadieron por un tiempo. Sin embargo, en noviembre de 2021, cuando la aldea de Apiwtxa celebraba un cónclave para analizar las redobladas amenazas de madereros y narcotraficantes, la justicia peruana autorizó la devolución de los tractores. Una de las empresas intentó entonces de nuevo penetrar en la región, valiéndose de una argucia archiconocida: «divide y vencerás». Pretenden convencer a jefes indígenas para que firmen contratos de explotación silvícola a título individual. La lucha de los asháninca, que llevan decenios librando, continúa.

Contemporáneos, no modernos

Desde 1992, cuando una comunidad asháninca obtuvo la titularidad legal sobre 870 kilómetros cuadrados de terreno forestal parcialmente degradado, junto al río Amonia, la transformación ha sido asombrosa. Sometidos durante tres siglos al yugo de colonos y misioneros, ante el que solo cabía luchar o huir, el escaso millar de habitantes de la aldea de Apiwtxa, en la Tierra Indígena Kampa do Rio Amônia, se ha convertido en una comunidad independiente y en gran medida autosuficiente. Han regenerado el bosque, dañado como estaba por la tala y la ganadería, han recuperado especies amenazadas y mejorado su seguridad alimentaria gracias a sus prácticas de caza, recolección, agrosilvicultura y cultivo itinerante. En definitiva, han construido un modo de vida que confían asegurará la continuidad de la comunidad y de sus principios. Estos logros, así como el apoyo a las comunidades aledañas, les han reportado varios reconocimientos, incluido el Premio Ecuatorial de las Naciones Unidas en 2017.

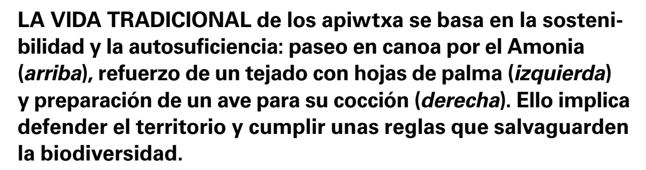
La filosofía vital de los apiwtxa, inspirada en visiones chamánicas y complementada con la información del mundo exterior, se basa en la protección y el cuidado de todos los seres vivos del territorio. Los asháninca creen que su bienestar depende de la biodiversidad del Amazonas. Estas creencias derivan de la íntima relación que establecen con la flora, la fauna, los astros y otros elementos del paisaje, a los que consideran parientes cercanos. Estos seres, en especial la planta de la ayahuasca (*Banisteriopsis caapi*), a la que llaman *kamarãpi*, los ayudan a tratar las enfermedades y los orientan mediante visiones. «Nuestra vida es un hechizo», me dijo el chamán Moisés Piyãko en julio de 2015. «Lo que vivimos en Apiwtxa es todo lo vivido antes en el mundo del *kamarãpi*.»

Como artífices de su futuro en vez de víctimas de las circunstancias, los apiwtxa están viviendo el concepto descrito por Arturo Escobar, experto en desarrollo, en su libro *Designs for the Pluriverse* (2018). Llevando la teoría del diseño a la esfera de lo político-cultural, Escobar describe el diseño social como un medio para que los pueblos tradicionales conciban soluciones innovadoras ante los problemas contemporáneos. Según él, los momentos de desorden social, cuando «se interrumpe el devenir habitual del mundo», propician la aparición de nuevas maneras de vivir. Para ello es indispensable contar con un territorio propio, un remanso de paz donde pueda florecer el diseño, añade Escobar. En la lucha por defender su tierra, los apiwtxa han hecho realidad ese ideal: han combatido la decadencia social y ecológica para tomar las riendas de su destino, en coexistencia armónica con los seres de los que dependen.

La primera vez que visité la aldea de Apiwtxa, en 2015, era parte de la investigación para mi doctorado en antropología. Tuve que pedir per-







LA VIDA TRADICIONAL de los apiwtxa se basa en la sostenibilidad y la autosuficiencia: paseo en canoa por el Amonia (*arriba*), refuerzo de un tejado con hojas de palma (*izquierda*) y preparación de un ave para su cocción (*derecha*). Ello implica defender el territorio y cumplir unas reglas que salvaguarden la biodiversidad.

ANDRÉ DIB

miso a cuatro instancias: a mi universidad, a dos organismos públicos brasileños y a los propios apiwtxa. Para llegar hay que tomar un vuelo de línea a Cruzeiro do Sul, fletar allí una avioneta hasta Marechal Thaumaturgo y luego cubrir tres horas más de navegación en barca. A los pocos días, me di cuenta de que no sería fácil estudiar a los asháninca. El expolio y el sometimiento que han sufrido durante siglos hace que recelen de los forasteros. Me observaron varios meses, ellos a mí, antes de aceptar mi convivencia. Su decisión se fundamentó en mi voluntad de colaborar con sus proyectos, mi empatía con sus principios y mi profundo respeto por su valentía y sabiduría. Acabé viviendo y trabajando con ellos durante dos años, una experiencia trascendental.

Ya había trabajado con varios grupos indígenas, desde principios de los 2000, como investigadora, como asesora de impacto ambiental para proyectos de desarrollo y más adelante en calidad de empleada de la FUNAI, la Fundación Nacional del Indio, del Gobierno brasileño. Conocía bien la devastación que entraña la voracidad del norte por el petróleo, los minerales, la madera y demás recursos forestales. Los asháninca me parecieron notables, no obstante, por su penetrante análisis de las agresiones sufridas y por la previsión con la que planeaban sus respuestas. No eran «modernos», es decir, no buscaban un progreso a imagen y semejanza del modelo occidental. En vez de eso, eran excepcionalmente «contemporáneos», es decir, hallaban sus propias soluciones a los problemas del presente. Como ha dicho el filósofo y socioantropólogo Bruno Latour, «saber cómo ser contemporáneo, cómo pertenecer a la propia época, es lo más difícil que existe». Me sentí sobrecogida y admirada por el ingenio y la resistencia de los moradores de Apiwtxa.

«A los asháninca nos han masacrado los madereros, nos han masacrado los caucheros, nos han masacrado los colonos... Nos tomaron como mano de obra y nos obligaron a trabajar para los patrones, que nos mandaban talar el bosque y cazar para que ellos comiesen bien; nos masacraron los misioneros, que nos decían que éramos unos ignorantes», me contó Benki Piyãko, un jefe asháninca. «Pero decidimos oponer otra forma de resistencia: nos pusimos a estudiar.»

El primer «estudiante», como lo llama Benki, fue su abuelo, Samuel Piyãko, que quiso entender los imperativos económicos que llevaban a los extranjeros a explotar la selva y a su gente. Nacido en Perú, fue un chamán que trabajó en las plantaciones de algodón en régimen de servidumbre por deudas. En este sistema se forzaba a los indígenas a trabajar a cambio de una miseria, obligándoles a comprar las herramientas y los artículos de subsistencia a sus opresores, a precios exorbitantes, por lo que quedaban atrapados en unas deudas perpetuas que jamás podían saldar. En algún momento de los años treinta, Samuel escapó y descendió por las laderas andinas hasta la selva brasileña, donde también se encontró con colonos que arribaban por los grandes ríos amazónicos.

«No tengo escapatoria», pensó Samuel, según relata Benki. «Tendré que adaptarme. Me quedaré aquí y consultaré a mi espíritu para ver cómo puedo seguir conectado» a los demás seres y personas. Los descendientes de Samuel dicen que usó sus poderes chamánicos para concebir la transformación que su pueblo ha logrado desde entonces. «Lo que está ocurriendo aquí es el sueño de mi abuelo», dice Moisés, hermano de Benki. «Aquí estamos sus nietos, cumpliendo lo que él creyó que garantizaría la supervivencia de nuestra gente y el mejor camino para nosotros.»

Con el tiempo, Samuel se ganó la consideración de *pinkatsari*, o jefe, a cuyo resguardo se asentaron otras familias asháninca. Más adelante, cuando uno de sus hijos, Antônio, quiso casarse con una lusófona no indígena, de una familia de ganaderos y caucheros, Samuel les dio su beneplácito y afirmó que la mujer sería una aliada. Tenía razón. Como la familia de ella se opuso de entrada al enlace, Francisca Oliveira da Silva, que luego adoptaría el nombre de Dona Piti, se instaló en la casa familiar de Antônio, trayendo consigo sus conocimientos sobre el mundo exterior.

En los años sesenta, muchos asháninca comenzaron a trabajar para empresarios madereros, que se aprovechaban de su desconocimiento para explotarlos: por ejemplo, pagándoles unas míseras cerillas a cambio de un árbol de caoba. Piti les explicó el valor que tenían esas mercancías, para que entendieran que los estaban estafando. Con ánimo de poner fin a la explotación y hacer valer sus condiciones, la comunidad fundó una cooperativa en los años ochenta. Bebito Piyãko, uno de los hijos de Piti y Antônio, recuerda: «Nos estaban engañando. Pensamos que la cooperativa acabaría con esa dependencia». La cooperativa Ayõpare, constituida como sociedad de gestión colectiva, permitía a los miembros de la comu-









LA AUTONOMÍA, un principio rector de los apiwtxa, exige autosuficiencia alimentaria y económica. Una niña recoge maíz de un campo de policultivo (*arriba, izquierda*). Una tienda de la cooperativa vende artesanías, como un tocado hecho con plumas de guacamayo (*derecha*); estos artículos aportan ingresos sin perjudicar los recursos locales. Dora Piyãko (*izquierda*), la presidenta de la comunidad, muestra un fular portabebés.

nidad comerciar con sus productos a cambio de crédito, con el cual podían hacer compras en una tienda de la localidad.

Por entonces empezaba a extenderse la tala industrial, que causaba unos estragos nunca vistos por los ashánincas. Antaño se tardaban días en derribar un caobo con el hacha; ahora, con las máquinas, era cuestión de minutos. Las motosierras abrieron grandes claros en la selva. Los tapires y otros animales de caza huyeron. Los operarios venidos de ciudades lejanas se inmiscuyeron en las celebraciones de los asháníncas, propagando enfermedades y acosando a las mujeres. Varios conflictos de esta índole, en toda la cuenca del Amazonas, motivaron un amplio movimiento social que culminó en 1988 con la aprobación de una constitución brasileña más progresista. El texto reconocía los derechos de los pueblos indígenas a aprovechar los recursos naturales de sus territorios siguiendo las técnicas tradicionales. Con la nueva constitución en vigor, los asháníncas solicitaron la ayuda de

la FUNAI para adquirir derechos territoriales sobre la selva circundante.

Los madereros y los ganaderos los amenazaron de muerte. En las idas y venidas entre Apiwtxa y Cruzeiro do Sul necesarias para hacer todos los trámites, tuvieron que sortear varias emboscadas. Aun así, Piti, Antônio y sus dos hijos mayores, Moisés y Francisco, presionaron a las autoridades brasileñas hasta que les otorgaron el dominio de sus recursos. No murió nadie, pero cuando el título de propiedad llegó, muchas familias ashánincas se habían marchado por miedo. El fallecimiento de Samuel durante aquellos meses convulsos, por causas naturales, sin duda acrecentó la sensación de inseguridad.

La unión hace la fuerza

Sabedoras de que la unidad y la cooperación eran fundamentales si querían sobrevivir, las familias ashánincas que quedaban, encabezadas entre otros por Antônio y Piti, emprendieron un proceso colectivo para planificar su porvenir. ¿Qué vida querían llevar y cómo lo conseguirían? Sondearon su territorio y sus experiencias, «buscando en nuestro interior lo peor de todo lo vivido, para reflexionar sobre los cambios que debíamos hacer», rememora Benki. Precisaron tres años de exploración y debate para diseñar su futuro, formular unas normas que mantuviesen la cohesión social y trazar un plan de gestión que les garantizase recursos suficientes y duraderos.

En ese tiempo, los doscientos habitantes fundaron la Asociación Apiwtxa, que representaría sus intereses ante la sociedad civil y el Estado brasileño. La comunidad se trasladó a un enclave estratégico en el extremo norte de su territorio, idóneo para mantener los invasores a raya y preservar su integridad social y su sistema de gobierno. Aunque solían formar familias nucleares dispersas, esta vez fundaron una aldea compacta, más fácil de proteger, a la que llamaron Apiwtxa.



ANDRÉ DIB

EN UN ENCUENTRO mantenido en las cabeceras del río Amonia en julio de 2021, los ashánincas de las aldeas de Apiwtxa y Sawawo debatieron la necesidad de proteger la selva amazónica de los forasteros que ansían sus riquezas sin importar el coste.

La palabra *apiwtxa*, traducible como «unión», significa la primacía de lo colectivo por encima de lo individual, uno de los principios rectores de la comunidad. Los aldeanos la aplican a diario, buscando el consenso en asambleas que pueden resolverse en una sola sesión o durar días, hasta que todos llegan al acuerdo. En esas reuniones, deciden cómo hacer frente a las agresiones externas y planean sus proyectos.

Los apiwtxa levantaron la nueva aldea sobre el río Amonia, en cuarenta hectáreas de antiguos pastos. Reforestaron la zona con especies autóctonas que cultivaron en viveros. Construyeron las cabañas a la usanza tradicional: cerca del río, sobre pilotes a prueba de serpientes y sin apenas paredes, para que circulara el aire. Sembraron frutales, palmeras y árboles maderables, además de plantas medicinales. Plantaron bananos y policultivos de maíz, yuca y algodón; cavaron pozas donde criar peces y tortugas con que reponer los recursos pesqueros del río; y para evitar la sobrecaza, marcaron zonas de veda de rotación periódica. Fundaron una escuela diseñada por ellos mismos, en la que se enseña en lengua asháninca durante los primeros cuatro años y donde se imparten tanto artes tradicionales (tejer, por ejemplo) como matemáticas y otras asignaturas. Algunos jóvenes emigraron para ir a la universidad y conocer el mundo exterior —sobre todo, sus sistemas económicos y políticos— antes de regresar a Apiwtxa con lo aprendido.

En la aldea, la jornada se organiza en torno a la cotidianidad: baño en el río, lavar la colada, cuidar de los cultivos, pescar, cocinar, reparar las viviendas y los útiles, jugar. Al atardecer, todo el mundo está agotado. Se cena antes del ocaso y los niños se acuestan después de escuchar unos cuentos. Algunas mujeres hilan el algodón, mientras que los líderes espirituales, en su mayoría hombres, mascan hojas de coca bajo las estrellas, sentados en silenciosa comunión. Los ashánincas se comunican mucho sin hablar, con gestos sutiles y con la postura. Nos acostábamos a eso de las siete o las ocho y nos despertábamos al alba, con el canto de los pájaros y otros sonidos de la selva, tras un sueño reparador.

Los reglamentos que aprobaron los apiwtxa en los años noventa se han ido convirtiendo en un complejo sistema de gobierno. Los jefes de la comunidad, muchos parientes próximos de Samuel, son chamanes, guerreros y cazadores que se ocupan de los asuntos internos, mientras que hay personas formadas en gestión de movimientos sociales que actúan como interlocutores con el exterior. Con un bagaje tan diverso, los apiwtxa se han hecho expertos en recaudar fondos de entidades públicas y privadas, por ejemplo para proyectos de reforestación.

Un segundo principio rector de la concepción asháninca es la autonomía, entendida como la independencia respecto de los sistemas de opresión y la libertad para decidir cómo vivir en su tierra. «Que no nos manden otros» es fundamental, asegura Francisco. El libre albedrío exige grandes dosis de autosuficiencia, para lo cual han reforzado su soberanía alimentaria y adoptado prácticas económicas y mercantiles que tienen un impacto mínimo en el medio. Todas las transacciones dentro y fuera de la comunidad se rigen por el antiguo sistema de trueque, denominado *ayõpare*, que es más que un mero intercambio de bienes, ya que abarca también la creación y el fomento de relaciones de apoyo y respeto mutuos. Lo viví durante mi estancia: si alguien me pedía unas pilas, por ejemplo, al cabo de unos días o unos meses aparecían en mi puerta una bandeja de frutas u otros regalos.

Una manifestación de este sistema es la cooperativa Ayõpare, que comercia solo con productos respetuosos con la naturaleza y con entidades que comparten los objetivos de los apiwtxa. «El bosque es nuestro capital y nuestra intención es preservar ese capital», explica Moisés. Los productos más populares de la cooperativa son las artesanías, que ayudan a conservar las tradiciones y proteger la selva, al tiempo que aportan una relativa autonomía económica. La cooperativa también permite a los apiwtxa difundir sus principios, por ejemplo vendiendo semillas autóctonas para reforestar otras partes del Amazonas.

La autonomía también se fortalece mitigando los peligros del mundo exterior. Con ese propósito han creado una zona de seguridad física y cultural en torno a su territorio, ayudando a las comunidades indígenas vecinas a recuperar sus tradiciones y proteger la biodiversidad. La subyugación ha provocado que varios grupos ashánincas, sobre todo en Perú, adopten hábitos insostenibles o sucumban a las presiones del mercado para malvender la madera y otros recursos forestales, tal como constataron Benki y Moisés. Los chamanes creen que para enmendar esa situación hay que restaurar la





ANDRÉ DIB

LOS ASHÁNINCAS creen que todas las criaturas, además de los elementos del paisaje, como el río Amonia (*izquierda*), son seres sensibles y están conectados entre sí por relaciones de reciprocidad. Las visiones inducidas por la ayahuasca (*derecha*) refuerzan la empatía que sienten hacia los demás seres. Francisco Piyãko (*arriba*) comulga con un ceibo (*Ceiba pentandra*), árbol al que le atribuyen grandes poderes vitales.

comunicación con la naturaleza a la manera ancestral. De hecho, los líderes apiwtxa consideran que esos conocimientos atávicos son un recurso vital no solo para ellos, sino para toda la humanidad. «No basta con trabajar en nuestra tierra, porque no es más que un pedacito de este gigantesco mundo que está siendo destruido», asegura Benki.

Los asháinincas rechazan la noción de que la naturaleza esté al servicio de la humanidad, y sostienen, por el contrario, que los humanos formamos un todo con ella. Según su cosmogonía, las criaturas primigenias eran todas humanas, pero Pawa (el creador) las transmutó a muchas en aves, animales, plantas, piedras, astros, etcétera. A pesar de tener formas distintas, conservan su carácter humano y todas están emparentadas con los asháninincas. Muchas otras tradiciones indígenas postulan, en la misma línea, que las plantas y los árboles, las aves y los demás animales, las montañas, las cataratas y los ríos, entre otros seres, son capaces de hablar, sentir y pensar, y que están ligados a los demás seres por relaciones recíprocas.

Un mundo sintiente

La ayahuasca les ha enseñado que todos los seres traban conexiones íntimas entre sí, afirman los asháinincas. En su mitología, la liana de ayahuasca brotó del lugar donde fue enterrada una sabia, llamada Nanata, por lo que la planta posee su sabiduría. Un cacique (un ave del género *Cacicus*) les explicó entonces cómo mezclar la liana con la hoja de la chacruna (*Psychotria viridis*) para cocer la pócima sagrada, el *kamarãpi*. «Lo bebieron y lo llevaron a su pueblo, llevándoles luz y entendimiento», dice Benki.

Los rituales del *kamarãpi* siempre son nocturnos, a ser posible bajo un cielo raso. No se enciende lumbre ni se habla; la ocasión reclama solemnidad. En cuanto el preparado psicoactivo surte efecto, el chamán que guía la ceremonia entona cánticos dirigidos a los pájaros y a los espíritus celestiales. Pronto se le unen los demás participantes, cuyas voces se entreveran en una potente polifonía. Es en este momento cuando se producen las visiones. El chamán está atento a todos los participantes y vigila lo que sienten, para intervenir si es necesario.

Cuando participé en el ritual, sentí que mi cuerpo se disolvía en el entorno, que me fundía con el medio, en un trance indescriptible. Tuve

Los apiwtxa proponen un sistema económico y social en que la colaboración prime sobre la competición, donde cada ser tenga su lugar y su importancia dentro del todo

una profunda sensación de conexión con los demás seres. En mi experiencia, la ceremonia del *kamarãpi* crea vínculos muy fuertes entre todos los presentes, y entre ellos y las criaturas del bosque, permitiendo que la comunicación fluya en silencio incluso después de concluir el ritual.

Tal como lo ve Moisés, el *kamarãpi* ayuda a desarrollar la consciencia porque guía a las personas en el autoconocimiento y, gradualmente, en el conocimiento profundo de otras personas y de seres de naturaleza distinta. Este conocimiento los guiará luego en sus acciones y sus relaciones. Los rituales chamánicos guardan paralelismos con la psicoterapia, según señaló el etnoantropólogo Claude Lévi-Strauss; el chamán, al igual que el psicoterapeuta, ayuda a la persona a examinarse a sí misma y analizar sus relaciones con los demás. Sin embargo, los psicoterapeutas apenas empiezan ahora a entender las propiedades de las sustancias psicoactivas en los aquejados de traumas, entre otros trastornos, para que se reconcilien con su sufrimiento y puedan sanar. El ritual del *kamarãpi* va más allá, genera una empatía profunda no solo con uno mismo, sino con los demás humanos y las demás criaturas, amén de los ríos y de otros componentes del paisaje. Todo se ve interconectado, una percepción que tiene implicaciones importantes sobre el trato que dispensamos a la naturaleza.

Los chamanes de Apiwtxa atribuyen su capacidad de diseñar su sociedad a las visiones



ANDRÉ DIB

LOS MEANDROS DEL AMONIA discurren por la Tierra Indígena Kampa do Rio Amônia, en el extremo occidental de la cuenca del Amazonas.

del *kamarãpi*. Moisés, Benki y otros chamanes suelen consultar a la ayahuasca, con cuya ayuda acceden a un estado psíquico alterado en el que pueden sondear el futuro y encontrar soluciones a sus contratiempos. Se sabe que los sueños facilitan la resolución de problemas; permiten enlazar conceptos inconexos que de ordinario no son asequibles a la mente racional. Los chamanes entran en esos estados mentales para imbuirse de sabiduría y facultades adivinatorias.

Soñar es imprescindible, pero no es suficiente, puntualiza Benki. También hay que planificar, pensar con consciencia y racionalidad, y actuar en el presente. Cuando un chamán tiene una visión trascendente, la comunidad delibera y traza un plan de acción. Después de que Benki soñara con un centro para divulgar la filosofía de los pueblos de la selva —un lugar cuyas raíces serían el conocimiento ancestral, pero que se proyectaría al mundo con un mensaje de amor por todos los seres—, los apiwtxa se pusieron manos a la obra y en 2007 fundaron el centro Yorenka Atame («sabiduría del bosque»).

Construyeron el edificio en un potrero de Marechal Thaumaturgo, el pueblo situado río abajo a tres horas de Apiwtxa. Yorenka Atame se ideó como una forma de mostrar a la gente del pueblo que existe una alternativa de vida. El potrero es ahora una floresta repleta de árboles frutales. Tiempo antes, mientras ejercía como secretario municipal de medioambiente, Benki se propuso apartar a los jóvenes del narcotráfico enseñándoles agrosilvicultura e invitándoles a ceremonias de *kamarãpi*. La ayahuasca tiene sus riesgos: su efecto depende de una preparación meticulosa y de las dotes y la ética del supervisor. Benki esperaba que, con su orientación, el ritual reconectase a los jóvenes con la naturaleza. Y así fue: le ayudaron a replantar el entorno de Yorenka Atame y luego fundaron un asentamiento bautizado Raio do Sol («rayo de sol»), en el que cultivan productos ecológicos.

Yorenka Atame es un espacio de intercambio de conocimientos sobre el bosque y de debate en torno al verdadero significado del desarrollo.

En él se han celebrado encuentros de pueblos indígenas y estudiosos de todo el mundo. «No tenemos enemigos, sino colaboradores y aliados con los que a veces discrepamos», asegura Francisco; y es que los apiwtxa apuestan por el diálogo con todos. Gracias a los intercambios auspiciados por Yorenka Atame, los caucheros de la región han reforestado sus tierras y se ha revitalizado la cultura de muchos grupos indígenas, como los puyanawa, que habían sido esclavizados y prácticamente exterminados por los caciques del caucho.

Todas esas actividades han dado a la comunidad apiwtxa, a pesar de lo pequeña que es, una enorme presencia e influencia en la región. Isaak Piyãko, otro de los hijos de Antônio y Piti, se convirtió en 2016 en el primer alcalde indígena de Marechal Thaumaturgo. Ser uno de los líderes de Apiwtxa, cuyos logros gozan de respeto unánime, contribuyó seguro a que ganara las elecciones.

En 2017 Benki puso en marcha otro proyecto, Yorenka Tasori («la sabiduría del creador»), con otros colaboradores y dotado con local propio, para difundir los conocimientos espirituales y medicinales de los indígenas. Yorenka Tasori tiene una iniciativa para proteger los enclaves sagrados de los asháninca, que suelen ser lugares de gran belleza natural cuya existencia peligra por el avance de las carreteras, los diques y otras industrias extractivas. Con una doble vertiente política y espiritual, el objetivo es revitalizar los vínculos tradicionales entre los asháninca, como forma de restaurar su fuerte cohesión interna. De esta manera (preservando su conocimiento ancestral, sobre todo la conciencia de la interconexión entre todos los seres, y transmitiendo estos dones a las generaciones jóvenes), los apiwtxa esperan garantizar la continuidad del pueblo asháninca.

Acompañé a Benki y otros representantes de Apiwtxa en sus visitas a los lugares sagrados en territorio peruano, y me emocionó su potente magnetismo. El aura de serenidad y poder que desprenden resulta muy atrayente, por lo que nuestro grupo se engrosó a medida que viajábamos. Los líderes apiwtxa infunden esperanzas allí donde van; tanto es así que el jefe de otra comunidad nos dijo: «Debe de ser el mismo Pawa quien te envía hasta aquí para abrirnos los ojos».

Los apiwtxa esperan abrirnos los ojos también a nosotros, con su mensaje de unidad y comunión entre todos los seres. Creen que la percepción espiritual de esa unidad esencial nos señala una salida a nuestra época, marcada por las crisis sociales y ecológicas. La actual era geológica ha sido llamada «Antropoceno» por la acción del hombre sobre la Tierra. Se caracteriza por la implacable expansión de las actividades que perjudican la atmósfera, los mares y la vida salvaje, hasta el punto de poner en peligro la integridad de la biosfera. Pero el *ánthropos* menos culpable del Antropoceno —los pueblos apegados a su forma de vida tradicional— son los que más sufren sus consecuencias: la destrucción del medio y de su subsistencia.

En lugar del crecimiento infinito y las industrias extractivas, los apiwtxa proponen un sistema económico y social en el que la colaboración prime sobre la competición, en el que cada ser tenga su lugar y su importancia dentro del todo. Cuidando de los seres humanos y los que no lo son, y cultivando la diversidad mediante la protección, la restauración y el enriquecimiento de la vida, nos indican cuál es el camino de salida del Antropoceno.

«Este mensaje proviene de la Tierra, para que la humanidad comprenda que estamos aquí de paso y no podemos preocuparnos solo de nuestro bienestar», dijo Benki en un llamamiento al mundo en 2017. «Tenemos que pensar en las generaciones venideras y en el legado que les dejamos. Hemos de velar por nuestros hijos y por el planeta. No podemos dejar la tierra empobrecida y envenenada, como estamos haciendo. Hoy ya vemos grandes catástrofes, grandes migraciones de gente que abandona sus países en busca de agua potable y de alimento. Presenciamos una guerra por la riqueza, pero pronto veremos guerras por el agua y la comida.

«¿Esperamos? ¿O cambiamos la historia? ¡Súmense!».

Carolina Schneider Comandulli trabaja con los pueblos indígenas del Amazonas y de las selvas atlánticas desde los primeros años 2000. Es doctora en antropología por el Colegio Universitario de Londres. La **Asociación Apiwtxa** representa los intereses e ideales de la comunidad apiwtxa, de la Tierra Indígena Kampa do Rio Amônia, en Brasil.



EN NUESTRO ARCHIVO

Vivir con la selva. Jerome Lewis en *IyC*, agosto de 2020.
Economías alternativas para un mundo sostenible. Ashish Kothari en *IyC*, agosto de 2021.
El poder de la agroecología. Raj Patel en *IyC*, enero de 2022.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

LAS MÚLTIPLES CARAS DE LA CIENCIA CIUDADANA

Nuevas formas de relación entre la ciencia y la sociedad

Marta I. González García

«Ciencia ciudadana» es una etiqueta ubicua en nuestros días. Cuando el público no experto se implica en la detección de ondas gravitacionales, el seguimiento de especies amenazadas o el registro de contaminación lumínica, está practicando ciencia ciudadana en el uso más habitual del término. Sin embargo, casos como el de la comunidad de Love Canal, en el estado de Nueva York, que se organizó en los años setenta para recopilar datos que mostraran la relación entre el cementerio de residuos industriales sobre el que su barrio estaba construido y los persistentes problemas de salud que les aquejaban, o el trabajo que desde la experiencia de las personas intersexuales desarrolló la ISNA (Intersex Society of North America) en los años noventa para promover cambios en el abordaje médico de la intersexualidad, son también presentados a menudo como ejemplos de ciencia ciudadana. En los últimos años, las comunidades de *biohackers*, desarrolladores de *software* libre y *makers* aparecen asimismo frecuentemente listadas bajo el paraguas de «ciencia ciudadana».

Todos estos ejemplos tan heterogéneos tienen una cosa en común: la participación del público no experto en procesos científico-técnicos. Sin embargo, su irreductible diversidad complica la tarea de establecer una definición más precisa.

La ciencia ciudadana tiene una breve historia, aunque un largo pasado. Su pasado es tan largo porque, antes de la aparición de la ciencia como profesión en el siglo XIX, la mayor parte de la investigación que hoy denominaríamos científica era desarrollada por *amateurs*. Es más, se asumía que quien investigaba sin recibir remuneración por ello produciría conocimiento más objetivo, no sesgado por el beneficio económico. La creciente profesionalización y especialización de la actividad científica levanta una frontera bien definida entre la ciencia y el público e invierte la presuposición previa, de tal modo que ahora se asume que solo la comunidad profesional de especialistas tiene capacidad de producir conocimiento fiable. La breve historia de la ciencia ciudadana comienza a finales del siglo XX, cuando la frontera entre personas legas y expertas lleva un siglo solidificándose.

Ciencia ciudadana para y desde la ciencia

En 1996, el ornitólogo de Cornell Rick Bonney recogía la tradición del naturalismo *amateur* para introducir el término y la práctica de la «ciencia ciudadana» en su laboratorio. La ciencia ciudadana de Bonney hace referencia a proyectos en los que el público colabora en investigaciones coordinadas desde las instituciones científicas, sobre todo a través de la recogida de datos de

campo. Un ejemplo clásico es el recuento navideño de pájaros que la Sociedad Audubon lleva organizando desde 1900 (ornitólogos aficionados guiados por especialistas contribuyen anualmente al mayor censo de aves del mundo). En el sentido de Bonney, la ciencia ciudadana es una suerte de voluntariado científico. Este tipo de prácticas ha ido ganando popularidad en los medios, las instituciones científicas y las agencias financiadoras, que en los últimos años han lanzado al estrellato la idea de ciencia ciudadana.

La ciencia ciudadana así entendida aprovecha al público como fuerza de trabajo para ampliar la base empírica. Aunque la observación de campo y la recogida de datos son las formas tradicionales en las que la ciudadanía ha contribuido a los proyectos científicos, la creciente digitalización de nuestra vida ha conducido a una mayor variedad de posibilidades de colaborar a través de una simple conexión a Internet. Una forma básica de hacerlo es prestando parte de la potencia de cálculo de nuestros ordenadores para proyectos como SETI (de búsqueda de vida extraterrestre inteligente) o Einstein@Home (de detección de ondas gravitacionales). Otros proyectos requieren una participación más activa, como Galaxy Zoo, en el que los participantes reciben instrucciones básicas para clasificar galaxias. Quienes prefieren las letras pueden colaborar identificando la narrativa del cambio climático en los medios o leyendo cuadernos de bitácora de buques del pasado, en busca de datos sobre la evolución del clima y los hielos árticos. Muchas de estas iniciativas se basan en la inteligencia colectiva. Por ejemplo, Foldit, un videojuego de predicción de la estructura de proteínas lanzado en 2008 por la Universidad de Washington y para el que solo se necesita saber resolver puzles, invita ahora a colaborar en el diseño de una proteína antivírica para bloquear el SARS-CoV-2.

En la actualidad existen múltiples plataformas que recogen iniciativas de ciencia ciudadana con diversos niveles de especialización y habilidades requeridas. Zooniverse y SciStarter son algunas de las más reconocidas internacionalmente. La Asociación Europea de Ciencia Ciudadana ha puesto en marcha la plataforma EU-Citizen.Science, y en España existe desde 2016 el Observatorio de la Ciencia Ciudadana, impulsado por la Fundación Ibercivis con el apoyo de la FECYT.

El extraordinario crecimiento de la ciencia ciudadana en los últimos veinte años no ha estado exento de crítica. Aunque se reconoce el valor epistémico de la inteligencia colectiva y de las perspectivas y experiencias ciudadanas, no podemos obviar que existe un riesgo de instrumentalización de los públicos. Quienes prestan su tiempo, su esfuerzo y sus propios recursos materiales lo hacen de forma voluntaria, y es de esperar que continúen participando en la medida en la que obtengan alguna satisfacción personal. El efecto educativo suele aducirse

ISTOCK: SIBERIANART

también como uno de los principales beneficios para el público. Los logros colectivos, sin embargo, plantean el problema de cómo reconocer y recompensar la contribución ciudadana cuando conduce a un avance relevante en el conocimiento. Es importante que se comuniquen bien los objetivos del proyecto y los términos de la participación para evitar desconfianza o expectativas defraudadas.

Las voces críticas cuestionan la idea presente en la retórica de promoción de la ciencia ciudadana de que su práctica contribuye a democratizar la ciencia. Aunque aún no hay muchos datos sobre los públicos que participan en estas iniciativas, el perfil más habitual es el de un varón de raza blanca con niveles educativo y económico elevados. La ciencia ciudadana parece estar llegando solo a aquellas personas que ya se interesaban por la ciencia, con lo que su potencial democratizador resulta, de momento, limitado.

> **El gran éxito de la etiqueta conlleva el riesgo de que se disfrace de ciencia ciudadana lo que son intereses privados**

Esas críticas nos remiten a otro sentido menos conocido de ciencia ciudadana, pero que aparece en la misma época en la que Bonney pone en marcha los proyectos para ornitólogos aficionados. Mientras que Bonney estaba interesado en cómo la ciudadanía podía contribuir a los fines científicos, la idea alternativa de ciencia ciudadana está ligada más bien al modo en el que la ciencia puede contribuir a abordar los problemas de la ciudadanía, y enlaza con los discursos sobre democratización de la ciencia de los años sesenta y setenta. En la terminología de Gwen Ottinger, de la Universidad de Drexel, frente a la ciencia ciudadana promovida por la autoridad científica encontramos la ciencia ciudadana basada en los movimientos sociales.

Ciencia ciudadana para y desde la ciudadanía

Justo un año antes de la publicación pionera de Bonney, en 1995, y desde una tradición muy diferente, el sociólogo británico Alan Irwin publica su libro *Citizen Science: A study of people, expertise, and sustainable development*. La ciencia ciudadana de Irwin no parte de las necesidades de los científicos, sino de las de la propia ciudadanía. En dos sentidos: por un lado, podría entenderse como ciencia al servicio de la ciudadanía (ciencia democrática); por otro, como ciencia desarrollada desde la ciudadanía (ciencia participativa). De acuerdo con Irwin, el primer sentido implica el segundo. Es decir, una ciencia al servicio de las necesidades e intereses de la ciudadanía debe ser una ciencia participativa, en la que las personas no expertas contribuyan al desarrollo y la política científica. Esta participación, no obstante, tiene características muy distintas de las de la ciencia ciudadana al estilo de Bonney. Mientras que la ciencia ciudadana de Bonney sigue la guía de los expertos, la de Irwin surge de las propias necesidades sociales y, en muchas ocasiones, es crítica con las prioridades, metodologías y conclusiones de la ciencia certificada. Esta ciencia ciudadana nace del descontento y la desconfianza, y cuestiona la idea de ciencia universal y libre de valores que enfatiza la ciencia ciudadana en el sentido de Bonney.

A mediados de los años noventa, las relaciones entre la ciencia y el público constituyen el foco de una parte importante del estudio de la ciencia y la tecnología. El episodio de las vacas locas, la polémica sobre los organismos modificados genéticamente o la relevancia creciente de los problemas ambientales alimentaban en los países occidentales una crisis de confianza pública en la ciencia, similar a la desencadenada en los años sesenta y setenta por la carrera de armamentos, la proliferación nuclear, el uso de pesticidas o los vertidos industriales. Los estudios sobre ciencia y tecnología habían ido documentando y analizando, desde entonces, las dimensiones sociales de los desarrollos científicos y técnicos. Estos análisis fundamentaron un interés cada vez mayor en la evaluación pública y la democratización de la ciencia. Pero dichos estudios no solo describían estos efectos, sino que además estaban interesados en su evaluación pública y, en definitiva, en la democratización de la ciencia. Por otra parte, los estudios sobre comprensión pública de la ciencia, que se habían centrado



ISTOCK: SIBERIANART

en la medida demoscópica del conocimiento y actitudes de una ciudadanía en la que la hostilidad hacia la ciencia se entendía derivada de su ignorancia sobre esta, comienzan a adoptar posturas más reflexivas y a reconocer la complejidad de las relaciones entre los públicos y la ciencia. Cuando Irwin propone su «ciencia ciudadana», lo hace desde estas coordenadas, en las que transformar en diálogo la relación entre la ciencia y los públicos aparece como un paso fundamental para abordar la gestión política de los problemas ambientales y los riesgos técnológicos. Su propuesta forma parte de lo que Sheila Jasanoff denomina el «giro participativo» en los estudios sobre ciencia y tecnología.

Daniel Fiorino, experto en política científica que en los años noventa trabajaba para la Agencia de Protección Ambiental del Gobierno estadounidense, resume en tres los argumentos que fundamentan este giro participativo. Un argumento instrumental, según el cual la participación pública legitima las decisiones sobre riesgos técnológicos; un argumento normativo, de acuerdo con el cual la ciudadanía debe poder participar en decisiones que les afectan; y un argumento sustantivo, que sostiene que las personas no expertas pueden identificar problemas y soluciones que se les escapan a las expertas. Es este último argumento el que Irwin aduce para defender la ciencia ciudadana, haciendo referencia a los «conocimientos contextuales» generados fuera de las instituciones científicas y relacionados con la experiencia de los públicos. Los ejemplos de Irwin tratan sobre todo de los conocimientos de comunidades afectadas por riesgos ambientales y biomédicos, y por accidentes en instalaciones tecnológicas. Casos como la movilización de los veteranos de la guerra de Vietnam para denunciar los efectos del agente naranja, el papel de los activistas de Act Up! en la lucha contra el VIH o de la Red Nacional de Salud de la Mujer de EE.UU. (NWHN) para visibilizar los efectos de los estrógenos sintéticos sobre la salud de las mujeres son representativos de la ciencia ciudadana basada en movimientos sociales.

Ese tipo de participación pública en ciencia venía practicándose con otras denominaciones como investigación de base comunitaria, epidemiología popular o investigación-acción participativa. Aunque la idea de Bonney tuvo mucho más éxito que la de Irwin, muchas de estas iniciativas reaparecen ahora bajo el término paraguas de «ciencia ciudadana», algo que puede resultar conveniente para su visibilización y promoción pública.

¿Es posible una única ciencia ciudadana?

Los dos sentidos de ciencia ciudadana de los noventa difieren fundamentalmente en su punto de partida. En un caso, la lógica de la investigación científica marca las tareas para las que se recluta a la ciudadanía; en el otro, el objetivo es atender a las necesidades de una comunidad con una clara vocación política. No obstante, ambos enfoques aparecen ahora recogidos conjuntamente en algunas tipologías que intentan poner orden en la gran diversidad de experiencias que reciben la denominación de «ciencia ciudadana».

Una de estas tipologías es la que el propio equipo de Bonney propone en 2009 y que distingue tres tipos permeables de ciencia ciudadana: contributiva, colaborativa y cocreada. La primera hace referencia al voluntariado que recoge datos para alimentar un proyecto científico predefinido. En la segunda, la colaborativa, la ciudadanía también participa en el análisis de los datos y puede influir en las metodologías. Y en la cocreada, la ciudadanía ayuda a definir las preguntas e hipótesis de investigación, y participa en la recolección de datos, la interpretación y la difusión. Los dos últimos tipos de ciencia ciudadana implican una colaboración más activa del público en proyectos que pueden emerger de sus propias necesidades aunque estén dirigidos desde la ciencia certificada, es decir, que englobarían la ciencia ciudadana en el sentido de Irwin.

La epidemiología ambiental o la investigación en salud son dos áreas en las que aparecen numerosos proyectos con vocación de fundir los dos sentidos originarios en una ciencia ciudadana desde y para la ciencia y la ciudadanía al mismo tiempo. Un ejemplo son los proyectos de «ciencia ciudadana extrema» que promueve en África el Colegio Universitario de Londres, como el desarrollo de herramientas de análisis y visualización geográfica que puedan ser usadas por comunidades sin conocimientos tecnológicos para fines propios como vigilar la tala ilegal o la caza furtiva en sus territorios. En el ámbito de la salud existen multitud de experiencias iniciadas por personas afectadas para compartir datos sobre trastornos y tratamientos, como PatientsLikeMe o CureTogether, que constituyen también valiosas fuentes de datos para investigadores y farmacéuticas.

Precisamente el creciente valor de los datos como recurso, que ha convertido algunas de estas iniciativas en empresas lucrativas, exige plantear cómo se gestionará la información generada por la ciudadanía, abordando los problemas relacionados con la privacidad, la soberanía y la gobernanza de los datos compartidos. Son cuestiones cuya urgencia crece al ritmo que lo hace el protagonismo de la inteligencia artificial y los macrodatos en la ciencia ciudadana. En este sentido, una ciencia ciudadana con una implicación cada vez más activa del público no es necesariamente una ciencia que responda mejor a las necesidades sociales. El gran éxito y expansión de la etiqueta conlleva el riesgo de que se disfrace de ciencia ciudadana lo que son intereses privados. Preguntarse a quién benefician los proyectos es fundamental en estos casos.

La ciencia ciudadana, en definitiva, engloba hoy un mosaico complejo y diverso de estrategias para el desarrollo de objetivos científicos y sociales. Al permeabilizar la frontera entre la ciencia y el público aparecen oportunidades y riesgos de carácter epistémico y ético cuyo abordaje requiere, lo mismo que la propia ciencia ciudadana, transparencia, confianza y colaboración.

Marta I. González García es profesora titular de filosofía de la ciencia y la tecnología en el Departamento de Filosofía de la Universidad de Oviedo



PARA SABER MÁS

La ciencia posnormal: Ciencia con la gente. Silvio O. Funtowicz y Jerome R. Ravetz. Icaria, 2000.

Políticas del bosque: Expertos, políticos y ciudadanos en la polémica del eucalipto en Asturias. José Antonio López Cerezo y Marta Isabel González García. Cambridge University Press, 2002.

¡Todos sabios! Ciencia ciudadana y conocimiento expandido. Antonio Lafuente, Andoni Alonso y Joaquín Rodríguez. Cátedra, 2013.

Ciencia ciudadana: Cómo podemos todos contribuir al conocimiento científico. Caren Cooper. Grano de Sal, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ciencia ciudadana, ciencia abierta. Steven Bishop en *IyC*, diciembre de 2014.

FORO CIENTÍFICO

HABLEMOS DE SEXO (BIOLÓGICO)

El sexo es una variable que no suele tenerse en cuenta en las investigaciones biomédicas, lo que lleva a análisis e interpretaciones erróneos

Irene Miguel Aliaga

Los científicos nos pasamos años estudiando nuestra proteína favorita. Generamos modelos murinos para observar su función, identificamos un fenotipo asociado a ella y conseguimos reparar sus alteraciones con un fármaco. Incluso utilizamos células humanas para demostrar que la proteína interviene también en un mecanismo celular de nuestra especie. Pero una prestigiosa revista nos rechaza el artículo por no incluir individuos del sexo femenino. Vamos a ver por qué no debemos ofuscarnos.

¿Por qué es importante el sexo?

Muchos aspectos de la fisiología humana difieren entre los sexos. La incidencia y la progresión de la mayoría de las enfermedades corrientes, así como la respuesta al tratamiento, varían de uno a otro en algún grado. Esto debería aprovecharse para abordar tratamientos dirigidos. Sin embargo, el sexo no suele aparecer entre las variables de los estudios clínicos. Por ejemplo, solo el 4 por ciento de los realizados para la COVID-19 se plantearon incluirlo, a pesar de las claras diferencias que se han visto entre hombres y mujeres en la la infección, la mortalidad y la respuesta a los fármacos.

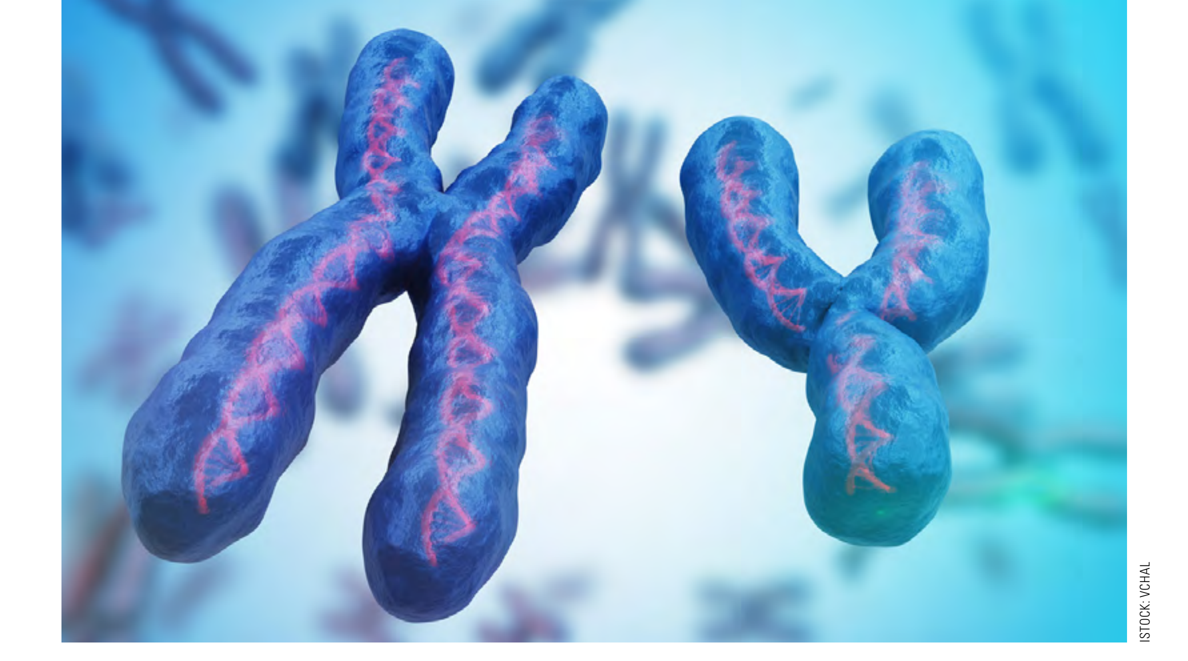
La falta de estudios en función del sexo ha resultado nefasta. Un buen ejemplo lo hallamos en el sesgo masculino que hay en los síntomas «de manual» del paro cardíaco, lo que ha retrasado el diagnóstico y el tratamiento de las mujeres. Al estudiarse la respuesta a los fármacos solo con varones, también se propusieron unas pautas de dosificación inapropiadas que podrían resultar peligrosas.

Las diferencias por sexo también son pertinentes en los modelos animales. El fenotipado sistemático de los ratones ha revelado que muchos rasgos fisiológicos y de conducta muestran dimorfismo sexual, como el efecto de la mayoría de las mutaciones genéticas. Aun así, en muchos estudios siguen utilizándose animales de un solo sexo (normalmente machos), en parte debido a que se pensó que los datos sobre las hembras siempre eran más variables por culpa del ciclo reproductor. El reciente hallazgo de que las fluctuaciones de la testosterona y otros factores provocan una variabilidad parecida en los machos ha vuelto vana esta suposición.

Como el sexo no solía aparecer entre las variables biológicas, tenemos muchas lagunas en el conocimiento. Las agencias de financiación y las revistas científicas intentan rectificar hoy esta situación y piden que se incluyan ambos sexos en los diseños experimentales y los análisis.

Diferencias más allá de las gónadas

Si ojeamos cualquier manual de anatomía, muy probablemente observaremos que los únicos órganos segregados por sexo son las gónadas. Sin embargo, la mayoría de los órganos no reproductores presentan diferencias anatómicas y transcripcionales (cantidad y tipo de transcritos de ARN). El cerebro no es una excepción: sin insistir en sus implicaciones, resultan obvias


ISTOCK: VCHAL

las variaciones en el volumen de determinadas subregiones, la expresión génica neuronal y la fisiología, no solo en los roedores, sino también en los humanos.

A lo largo de la historia, las diferencias sexuales en los órganos no reproductores de roedores y humanos se han atribuido exclusivamente a las hormonas. Pero ahora sabemos que también intervienen mecanismos celulares que se han estudiado poco y que están gobernados por los cromosomas sexuales. Por lo tanto, cualquier órgano conocería su sexo sin que se lo dijeran las hormonas gonadales.

Y a la inversa, cada vez somos más conscientes de la importancia de los mecanismos hormonales en los modelos animales, como la mosca de la fruta, cuyas diferencias entre sexos se pensaba que solo se manifestaban gracias a los procesos intrínsecos de las células. Este hallazgo abre la posibilidad de utilizar las técnicas genéticas para investigar la integración intracelular de las señales intrínsecas y extrínsecas y, de este modo, adquirir, mantener y tal vez modular las características con dimorfismo sexual.

El sexo de las células y las moléculas

Si los mecanismos intrínsecos contribuyen a que los órganos no reproductores presenten diferencias sexuales, entonces incluso las células in vitro y cualquier proceso que ocurra en ellas «tendrán un sexo». Resulta fascinante que, en los cultivos de células primarias, los organoides, las células embrionarias y las células madre pluripotentes inducidas (CMPI), se hayan descrito diferencias sexuales en la expresión génica, la proliferación celular o el comportamiento. También varían otros aspectos de la fisiología intracelular, como los condensados biomoleculares, la dinámica del citoesqueleto, la comunicación con los orgánulos o los mecanismos de infección vírica.

Todavía se no han esclarecido los mecanismos que rigen esas diferencias sexuales y, en el caso de las CMPI, persiste cierta controversia. En cambio, sí se conoce la contribución de ciertos genes de los cromosomas X e Y, así como de distintos mecanismos epigenéticos.

Cuando se contemplan las células, los órganos o los animales, la falta de diferencias por sexo observada hasta ahora no es excusa para seguir descartándolo en los futuros experimentos. Una línea celular o un modelo animal quizá no muestren diferencias sexuales al principio, pero podrían aparecer tras aplicarles un tratamiento. Además, el mismo fenotipo en machos y hembras podría deberse a mecanismos con dimorfismo sexual. Por ejemplo, aunque tanto los machos como las hembras de ratón perciban el dolor, el dolor crónico en ellos se procesa sobre todo en la microglía, mientras que en ellas depende más de los linfocitos T. Estos mecanismos dependientes del sexo tienen implicaciones obvias cuando nos fijamos en las enfermedades humanas, no solo en la propensión genética a padecerlas, sino también en su tratamiento.

Quienes se ocupen de estudios puramente moleculares podrían sentirse ajenos al problema por haber dejado atrás el entorno celular con dimorfismo sexual. Sin embargo, deberían incluir esta variable en las aplicaciones farmacológicas que desarrollen, dado que cada sexo podría pre-

sentar una diana diferente para el mismo fármaco, o incluso distinto mecanismo de eliminación. También habría que tener en cuenta el sexo del investigador porque, por ejemplo, los ratones y las ratas manejados por un varón sienten estrés y reducen su percepción del dolor, mientras que no ocurre así en presencia de una mujer.

¿Por qué primero el sexo?

¿Qué tiene de especial el sexo? Si el objetivo persigue el desarrollo de tratamientos más adaptados y eficaces, ¿no deberíamos considerar también factores como la edad, el estado reproductor, la etnia o la posición social? Cuando el tipo de experimento lo permita, lo ideal sería contemplar todas las variables relevantes. Sin embargo, intentaré demostrar que hay tres buenas razones para comenzar por el sexo.

Primero, si solo tuviéramos en cuenta un sexo, no atenderíamos a una importante fuente de variación que quizás afecte a casi la mitad de la población mundial. Segundo, si descubrimos una diferencia sexual, tendremos un punto de partida para una futura estratificación. Por ejemplo, las mujeres podrían responder de manera diferente a un tratamiento si han estado embarazadas, en cuyo caso habría que diseñar un segundo experimento para compararlas con las que no hayan tenido hijos. Por último, al tener en cuenta el sexo, tomaremos conciencia de lo importante que son tanto el diseño experimental como el análisis. Al hacerlo así, seguramente nos preguntaremos si el modelo que íbamos a usar en otro experimento conseguirá recapitular la biología de, por ejemplo, una enfermedad senil o una más prevalente en un grupo poco representado.

Sexo y género

Muchos investigadores interesados en estas diferencias consideran incorrectamente el sexo y el género como sinónimos. El sexo se refiere a los atributos biológicos que diferencian los organismos entre macho, hembra, intersexual y hermafrodita. En cambio, el género es una abstracción social que abarca diferentes características psicológicas y sociales que, en conjunto, definen a los individuos como hombres, mujeres, no binarios o trans.

Es importante que reconozcamos que ambos nos incumben como humanos: el género no niega ni invalida las diferencias sexuales, pero, del mismo modo, no todas las diferencias entre los sexos humanos tienen un fundamento social. Lo más sorprendente quizá sea que uno y otro modulan de manera independiente o sinérgica determinados rasgos (por ejemplo, el dolor) y actúan como factores de riesgo independientes para la enfermedad (por ejemplo, los roles del género «femenino» están asociados a un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular con independencia del sexo de la persona).

¿Cuánto costará?

También se daba por hecho que la incorporación del sexo entre las variables experimentales duplicaría el coste de la investigación. En algunos casos, bastará simplemente con separar (es decir, no agrupar) los datos donde vayan mezclados los sexos, así como elegir el diseño experimental o el análisis correcto. Esta elección no es nada trivial, porque muchos hemos analizado o interpretado mal los datos. Esto ha llevado a describir demasiados efectos específicos del sexo o, en los datos agrupados, a ignorar muchas diferencias cruciales debidas al sexo. Con frecuencia, la elección idónea son los diseños multifactoriales, en los que se contempla el sexo junto a otras variables de interés, como el genotipo o el tratamiento.

Volver a analizar un conjunto de datos en apariencia ruidoso podría revelar diferencias entre sexos en rasgos como la respuesta a cierto fármaco o a una manipulación genética. Por lo tanto, la inclusión del sexo no es solo clínicamente relevante y socialmente responsable, sino que eleva la probabilidad de detectar efectos significativos y reproducibles, lo que a su vez reduciría el número total de experimentos o animales que hay que utilizar.

Espero haber sido convincente sobre la necesidad de incorporar el sexo entre las variables de cualquier investigación, aunque a menudo no se tenga muy claro cómo hacerlo. Contamos con distintos tipos de recursos que aportan trucos útiles para diseñar, realizar, analizar y describir los experimentos. Si todavía os quedan dudas, ¡hacédmelo saber!

Irene Miguel Aliaga investiga en el Instituto Londinense de Ciencias Médicas del Consejo de Investigación Médica y en la Facultad de Medicina del Colegio Imperial de Londres.



Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, traducido y adaptado con el permiso de Nature Research Group© 2022.



BIOLOGÍA TISULAR

TÉCNICAS DE ÚLTIMA GENERACIÓN PARA ESTUDIAR LOS TEJIDOS BIOLÓGICOS

Marc Elosua Bayés | La transcriptómica espacial añade información sobre el contexto al estudio sobre la composición y la estructura de los tejidos. Declarada método del año 2020, está arrojando luz sobre procesos tan complejos como el desarrollo embrionario o la biología del cáncer

ISTOCK : VLADYSLAVDANILIN

Los paisajes que dibujan las células en un tejido me recuerdan a los mosaicos del genial Antoni Gaudí. En estos, un sinfín de piezas menudas de cerámica, cada una con su forma y color, se colocan en una posición precisa para dar lugar a coloridas obras de arte. Si quisiéramos describir uno de estos mosaicos, necesitaríamos identificar todos los tipos de piezas empleadas y conocer su ubicación exacta. Una cámara fotográfica con buena resolución nos bastaría. ¿Podríamos describir un tejido con el mismo grado de detalle? ¿Hay manera de saber qué tipo de células lo integran y la forma en que estas se organizan y se distribuyen en el espacio? Gracias al espectacular avance de la biología celular, cada vez estamos más cerca de poder responder que sí.

Desde mediados de la década del 2000, gracias al desarrollo de las técnicas de secuenciación masiva de ADN, los biólogos hemos logrado estudiar el genoma de un sinfín de organismos. Y no solo esto. La secuenciación también nos ha permitido conocer el transcriptoma, es decir, el grado en que los genes de un determinado genoma se expresan en forma de ARN en los distintos tejidos. Al principio, esas «postales tisulares» eran difusas. A partir de las ingentes cantidades de datos que arrojaba la secuenciación masiva, se obtenían solo valores promedio de la expresión génica en ese tejido. Siguiendo el símil del mosaico, es como si tuviéramos solo una idea de la mezcla de colores que lo componen (si hay más piezas azules y rojas, veremos un color liloso), pero no pudiéramos conocer con exactitud el espectro cromático del mismo.

En los últimos años, esas «postales» han ganado nitidez. Gracias a otra técnica, denominada secuenciación de células individuales, ya es posible estudiar a nivel individual las células que componen un tejido (o las piezas que integran el mosaico modernista) y entender qué particularidades las hacen especiales y únicas. Sin embargo, esta técnica adolece de un inconveniente: ignora el ecosistema. Es decir, nos permite ver cada una de las células, pero aisladas, fuera de su contexto tisular y, por tanto, sin conocer su entorno ni el modo en que se comunican con este (en el mosaico, sería como si no conociéramos la distribución de las piezas cerámicas en el espacio, lo que nos impediría intuir qué dibujo originan).

EN SÍNTESIS

Las técnicas modernas de la biología celular (secuenciación masiva de ADN, transcriptómica, secuenciación de células individuales, etcétera) han logrado grandes avances. Sin embargo, ofrecen solo visiones parciales del paisaje celular.

Para superar este escollo, ha nacido la transcriptómica espacial, un nuevo enfoque que tiene en cuenta el contexto y, por tanto, permite estudiar fenómenos para los cuales resulta crítica la interacción de las células con su entorno.

Este conjunto de técnicas de nueva generación, que fue declarado método del año 2020 por su enorme potencial, ya está cosechando frutos en oncología, biología del desarrollo, inmunología y neurología.

Pero, ¿es realmente tan importante conocer ese contexto celular? Rotundamente, sí. Resulta que el ambiente en el que vive una célula desempeña un papel crítico en su desarrollo y función. Por ejemplo, si una célula del músculo se encuentra en un medio óseo, no podrá llevar a cabo su tarea correctamente o, incluso, su actividad podrá verse alterada y causar enfermedades. Por tanto, solo si tenemos en cuenta el contexto podremos comprender el comportamiento de las células en toda su complejidad.

Con el propósito de superar esos retos metodológicos, durante los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a desarrollar estrategias que aúnen los dos enfoques y permitan estudiar las células individualmente pero sin obviar su entorno: una técnica que ofrezca una imagen nítida y detallada del mosaico celular (que permita saber dónde va exactamente cada pieza y obtener una imagen final completa). El camino no ha sido ni está siendo fácil. Se requieren protocolos experimentales detallados y constantemente optimizados, nuevas herramientas computacionales, ordenadores cada vez más potentes y, por supuesto, investigadores que desarrollen métodos para extraer e interpretar toda la información generada.

Con todo, los esfuerzos comienzan a dar frutos: podemos hablar ya de un nuevo enfoque, un conjunto de técnicas que confluyen en lo que se ha denominado «transcriptómica espacial». Por el gran potencial que encierra, fue declarada método del año 2020 por la revista *Nature Methods*. En este artículo revisaremos

Dos enfoques complementarios

Gracias al avance de las técnicas de la biología celular, cada vez podemos ahondar más en la composición y la arquitectura de los tejidos. Durante los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a desarrollar estrategias que aúnen dos enfoques esenciales y complementarios: el que busca la máxima resolución (análisis de células individuales) y el que busca conocer el contexto (métodos espaciales). El esquema muestra esta evolución metodológica, que ha culminado en la transcriptómica espacial de células individuales.



Transcriptómica
Ofrece una idea general de la expresión génica para todas las células de una muestra, pero carece de resolución celular y espacial



+

Transcriptómica de células individuales
Permite caracterizar los tipos celulares de un tejido, pero no nos dice nada sobre la organización de los mismos.



=

Transcriptómica espacial
Permite conocer la arquitectura de los tejidos (mapa de la expresión génica), pero de forma difusa.



Transcriptómica espacial con resolución celular
Permite descubrir nuevos tipos celulares y su localización en el tejido e identificar procesos patológicos.

CORTESÍA DE BO XIA

brevemente su desarrollo, los distintos retos a los que se enfrenta y las incógnitas que podría desvelar.

De la histología a la biología celular

Uno puede pensar que el interés de los científicos por los tejidos es reciente. Nada más lejos de la realidad. Los primeros estudios se remontan a principios del siglo xviii en el campo de la histología, la rama de la biología que se dedica a estudiar la estructura y composición de los tejidos. En su origen, la histología se basaba en la observación de tejidos mediante microscopía óptica. Con el paso de los años, numerosos avances técnicos (entre ellos la mejora del sistema de lentes o de los métodos de tinción, como el que desarrollaron Santiago Ramon y Cajal y Luis Simarro para la observación de neuronas enteras) permitieron obtener imágenes cada vez con mayor resolución.

En los años 80 se desarrolló la hibridación fluorescente in situ, el primer método que permitía detectar una molécula de ARN en su ubicación, es decir, en el lugar del tejido donde se encontraba. Se basaba en marcar el ARN con sustancias fluorescentes, de forma que podían visualizarse un puñado de transcritos por imagen. En 2009 llegó la transcriptómica de células individuales: ya era posible disociar tejidos, eliminar la matriz extracelular hasta obtener una suspensión de células y caracterizar la totalidad del transcriptoma hasta llegar al nivel de cada célula.

Así pues, comenzaba a ser posible obtener información sobre la organización del tejido (aunque no la suficiente como para entender plenamente el modo en que las células se relacionaban) y también estudiar el transcriptoma al completo e identificar tipos celulares. Contábamos, pues, con dos enfoques complementarios; dos técnicas que aportaban información imprescindible la una para la otra.

¿Cómo podían unirse las dos formas de «mirar» los tejidos? La solución pasaba por analizar la misma muestra mediante dos técnicas diferentes e integrar toda la información obtenida, teniendo en cuenta la proximidad física entre las células. Sin embargo, este proceso adolece de varios inconvenientes. Por un lado, se halla sujeto a sesgos, ya que la disociación deja «fuera de juego» todas los tipos celulares que requieren de las interacciones con el tejido para sobrevivir, con lo cual pasan a ser «invisibles» para la secuenciación de células individuales. Por otro lado, entraña limitaciones procedimentales, puesto que no siempre tenemos suficiente cantidad de tejido para llevar a cabo múltiples experimentos. Así que esta integración, aunque útil, no permite caracterizar de manera sistemática y exhaustiva tejidos y regiones complejas como embriones o el

microambiente de un tumor. Y es precisamente en muestras de gran complejidad como estas donde resulta esencial identificar qué tipos de células están presentes a la vez que conocer el contexto en el que se encuentran, ya que la comunicación entre una célula y su entorno resulta clave para determinar la evolución de esta. ¿Cuál ha sido el siguiente paso?

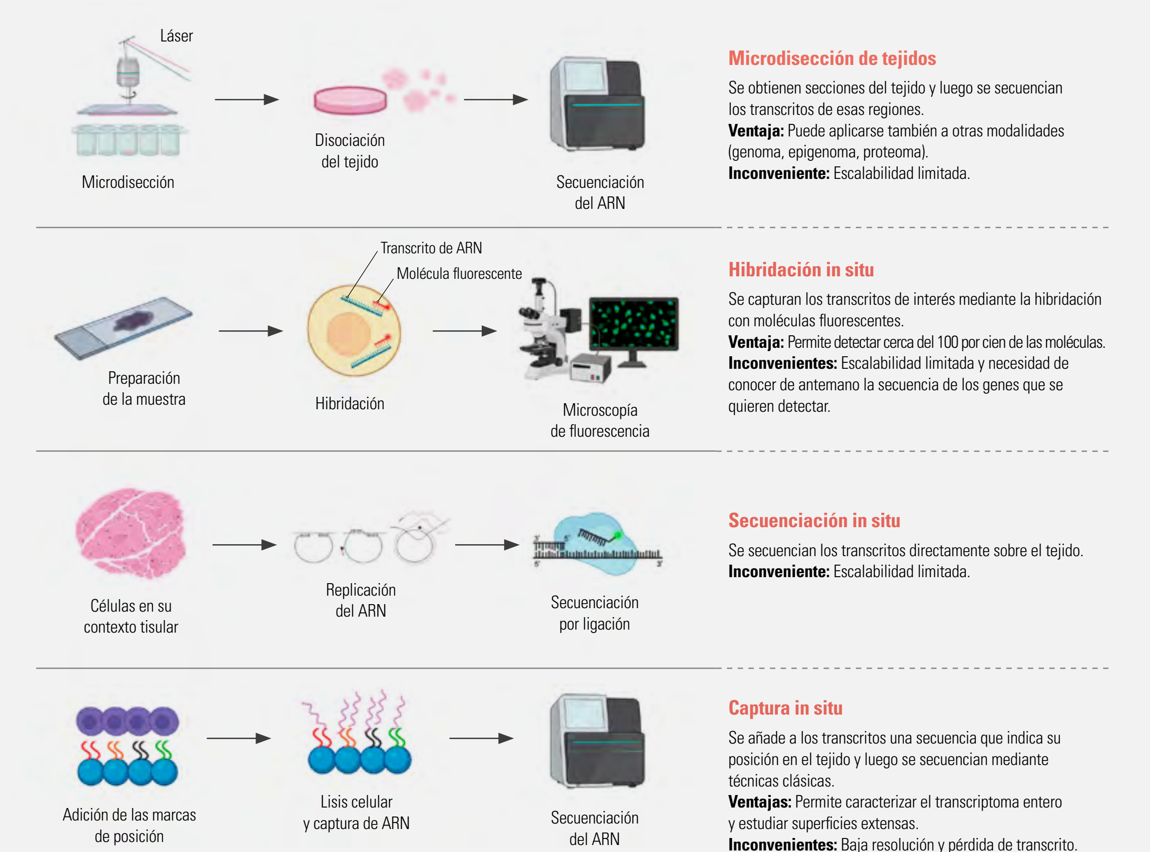
Un abanico de técnicas

A lo largo de los últimos años, en el contexto de la transcriptómica espacial, ha habido un auge de métodos que permiten capturar la información de miles de transcritos a la vez —¡algunos llegan a descifrar el transcriptoma entero!—. Se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función de la metodología usada para obtener la información. Cada uno tiene ventajas e inconvenientes. Los investigadores utilizan uno u otro según las necesidades de cada experimento.

El primer grupo corresponde a la microdisección de tejidos. Consiste esta en seccionar regiones tisulares de interés, llegando al nivel celular, y posteriormente secuenciar los transcritos de esas regiones. Su principal inconveniente es la falta de escalabilidad en cuanto al número de genes que se pueden detectar y la superficie de tejido analizada. La gran ventaja reside en que no está limitado a la transcriptómica; esto es, que ofrece la posibilidad de llevar a cabo ensayos de diferentes modalidades (secuenciación del genoma o del transcriptoma, ensayos epigenéticos o proteómicos).

Un abanico de técnicas

La transcriptómica espacial engloba en realidad una extensa familia de técnicas. Todas ellas permiten asignar tipos celulares (a partir de los transcritos de ARN) a localizaciones del tejido, pero cada una usa un método distinto para obtener la información del transcriptoma. Según el método usado, se clasifican en estos cuatro grandes grupos. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes.



El segundo grupo de técnicas se basa en la hibridación in situ, es decir, la hibridación (mediante la secuencia complementaria) de una molécula fluorescente al transcrito que queremos capturar. Es uno de los más utilizados, ya que permite detectar cerca del 100 por cien de las moléculas. En este caso, al problema de la escalabilidad se le añade la necesidad de conocer de antemano la secuencia de los genes que se quieren detectar.

El tercer grupo se basa en la secuenciación in situ. Consiste en secuenciar los transcritos directamente sobre el tejido, lo que permite detectarlos en su localización. Lo mismo que en los métodos anteriores, la gran desventaja es que solo puede estudiarse un área reducida.

El cuarto y último grupo es el de los métodos de captura in situ. Añaden a los transcritos una secuencia única de su posición espacial (una secuencia que indica la posición en el tejido en el que fue capturado ese transcrito) para luego secuenciarlos mediante técnicas clásicas. Estos permiten caracterizar todo el transcriptoma entero, sin tener que escoger un número limitado de genes (desaparece, por tanto, el sesgo del que adolecen las técnicas que requieren la disociación del tejido). Asimismo, permite estudiar superficies mucho más extensas, de hasta 40 centímetros cuadrados. Sin embargo, presenta dos grandes inconvenientes: por un lado, una baja resolución (en muchos casos obtenemos la información en grupos de entre solo 1 y 10 células), y, por otro, una pérdida de transcritos durante el proceso (se acaba secuenciando solo entre el 5 y el 10 por ciento del total).

Los primeros frutos

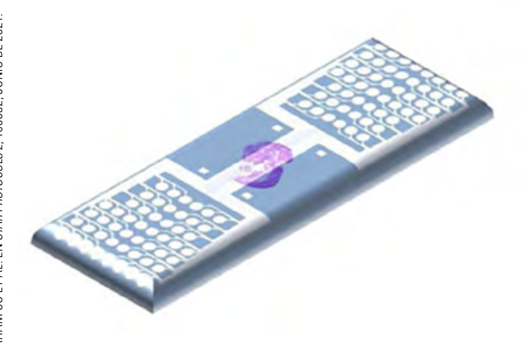
Además de arrojar luz sobre la heterogeneidad de los tejidos y los matices que definen los tipos celulares, la transcriptómica espacial nos puede ayudar a entender muchas otras cuestiones actuales de la biología. Por ejemplo, nos puede ayudar a ver cómo y cuándo las células interactúan entre ellas y entender cambios transcripcionales y epigenéticos derivados de estas. Como hemos comentado, engloba una multitud de técnicas que no paran de avanzar y mejorarse. Además, cada vez existen más protocolos para explorar las diferentes capas de información «ómica» (genoma, metiloma, transcriptoma, proteoma, etcétera). Este enfoque multimodal (suma de capas) nos aporta una riqueza increíble e indispensable a la hora de caracterizar los tejidos con toda su complejidad y entender cuáles son los mecanismos que regulan sus procesos y determinan sus particularidades.

Algunas de esas técnicas multimodales ya han empezado a comercializarse. Los kits de 10X Genomics, por ejemplo, permiten caracterizar el proteoma y el transcriptoma simultáneamente en la misma muestra. Otro ejemplo sería el método DBiT-seq (*deterministic barcoding in tissue for spatial omics sequencing*), publicado en *Cell* a finales del 2020 por el equipo de Rong Fang, de la Universidad Yale. DBiT-seq utiliza canales microfluídicos para marcar la disposición espacial de las células y permite extraer de forma simultánea diferentes tipos de información (proteómica, epigenómica y transcriptómica). Mediante canales microfluídicos paralelos se forma sobre el tejido una cuadrícula que permite marcar las células con identificadores específicos de cada fila y columna. De este modo, podemos saber a qué celda corresponden los transcritos, es decir, su posición en el tejido.

Un ejemplo del gran potencial que entraña la transcriptómica espacial lo hallamos en el Atlas Celular Humano, un consorcio internacional que pretende cartografiar todos los tipos celulares del cuerpo humano en base a sus características moleculares. Como ya hemos mencionado, la localización de las células resulta clave a la hora de determinar su destino, así que también es de vital importancia poder ubicar cada célula en su nicho para poder comprender qué la hace particular. Consorcios como estos amplían nuestro conocimiento de la biología y hacen factibles metas que hasta hace tan solo unos años parecían inalcanzables.

Uno de los estudios más completos a día de hoy basado en la transcriptómica espacial junto con la transcriptómica de células individuales lo publicaron en *Nature Biotechnology* a principios del 2020 Reuben Moncada e Itai Yanai, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, junto con otros colaboradores. En este trabajo, aplicaron la transcriptómica espacial sobre seis muestras de adenocarcinoma ductal de páncreas, de las cuales secuenciaron miles de células individuales. Los autores observaron que podían estratificar el tejido utilizando la información transcriptómica, determinar qué tipos celulares se encontraban en cada región e identificar qué mecanismos estaba utilizando el tumor para expandirse.

Primero emplearon la transcriptómica de células individuales para identificar qué tipos celulares se hallaban presentes en el tejido. Al estudiar miles de células, los investigadores pudieron capturar la variación biológica inherente en estos tejidos tan complejos e identificar subpoblaciones tumorales heterogéneas con diferentes perfiles de expresión génica. También lograron identificar diferentes células del tejido sano y células inmunitarias con actividad antitumoral.



FUENTE: SPATIAL MULTI-OMICS SEQUENCING FOR FIXED TISSUE VIA DBIT-SEQ. GRAHAM SU ET AL. EN *STAR PROTOCOLS* 2, 100532, JUNIO DE 2021.

CHIP MICROFLUÍDICO que permite marcar las coordenadas (*X* e *Y*) de tejido mediante la introducción de códigos de DNA en cada región.

Luego, mediante transcriptómica espacial, estratificaron el tejido en regiones diferentes (desde el punto de vista transcripcional), que se correspondieron con las anotadas por un histopatólogo. Ello les dio seguridad, ya que confirmó que el método permitía detectar las diferentes regiones del tejido sin necesidad de ver la imagen. Posteriormente, determinaron qué tipos celulares se encontraban en cada región utilizando como referencia los datos de célula individual obtenidos al principio. Este análisis reveló que las células sanas se localizaban en los compartimentos tisulares que les correspondían, mientras que las tumorales compartían territorio con células inmunitarias antitumorales y con una población de células sanas con unas características muy concretas. Estas células sanas expresaban programas genéticos que les permitían sobrevivir en ambientes de hipoxia (con escasez de oxígeno), algo nunca visto hasta la fecha. Además, también vieron que las diferentes poblaciones tumorales ocupaban diferentes regiones del tumor, que quedaba dividido en varios microambientes.

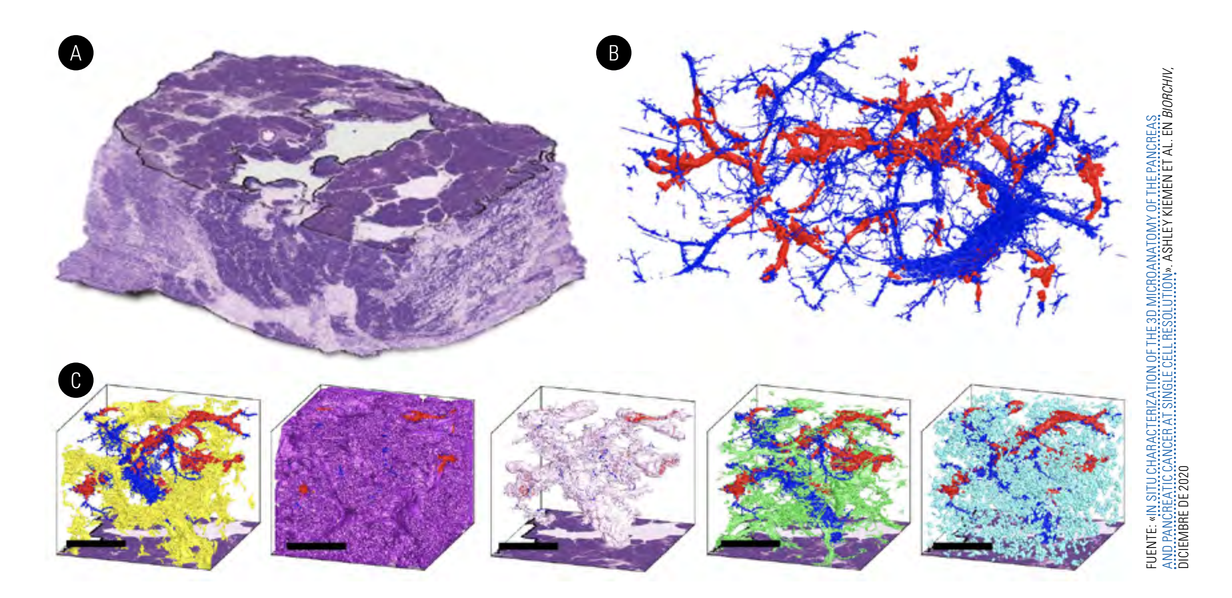
Estos hallazgos demuestran la importancia de estudiar las células en su contexto espacial, ya que resaltan el efecto del ambiente sobre el comportamiento de las mismas.

Otro trabajo publicado en 2017 en *Scientific Reports* por Michaela Asp, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, y sus colaboradores utilizó la transcriptómica espacial para estudiar las regiones del corazón tras sufrir una insuficiencia cardíaca. Hasta entonces, se pensaba que todo el tejido que moría quedaba inerte, sin posibilidad de recuperación. Sin embargo, mediante esta técnica observaron regiones que expresaban genes que regulan el desarrollo del corazón durante su etapa embrionaria (marcadores cardíacos fetales). La expresión de estos genes indica un cambio en el metabolismo que permite sobrevivir a las células en condiciones de estrés y abre la puerta a su posible utilización para regenerar estas regiones después de un infarto.

Las líneas de investigación más relevantes en este campo se centran en descifrar la heterogeneidad de los tejidos. Hagen U. Tilgner, de la Universidad de Medicina Weill Cornell, y sus colaboradores han descubierto el modo en que, en el cerebro del ratón, la identidad regional de las células determina la isoforma de algunos genes (las isoformas de un gen son las variantes que este puede presentar; las diferentes isoformas pueden dar lugar a proteínas con estructuras y, por tanto, funciones diferentes, aun viniendo del mismo gen).

Por otra parte, Alison Simmons y sus colaboradores de la Universidad de Oxford han caracterizado el desarrollo espaciotemporal del intestino, dibujando en el tejido trayectorias celulares, desde células progenitoras a estructuras diferenciadas. Asimismo, han identificado subpoblaciones del mismo tipo celular que adaptan su función según la región en la que se encuentran.

Cuando las células se especializan, las señales que reciben de las células vecinas resultan decisivas. Para Irepan Salvador-Martínez, experto en biología del desarrollo del Centro Nacional de Análisis Genómico del Centro de Regulación Genómica (CNAG-CRG), la transcriptómica espacial abre la posibilidad de generar nuevas hipótesis sobre la diferenciación que depende de la comunicación célula-célula. Dado que esta comunicación resulta clave para determinar el destino celular, «poder observar los genes en



FUENTE: «IN SITU CHARACTERIZATION OF THE 3D MICROANATOMY OF THE PANCREAS AND PANCREATIC CANCER AT SINGLE CELL RESOLUTION». ASHLEY KIEMEN ET AL. EN *BIORCHIV*, DICIEMBRE DE 2020

TEJIDOS EN 3D: La transcriptómica espacial permite obtener reconstrucciones tridimensionales de los tejidos que resultan de gran utilidad. Las imágenes corresponden al estudio de un tumor pancreático. Muestran la reconstrucción en 3D de un páncreas a partir de cortes histológicos (*A*); al lado (*B*), la estructura sana del epitelio ductal (*azul*) y la estructura de las células precancerosas (*rojo*); y abajo (*C*), diferentes estructuras y su conformación tridimensional: tejido adiposo (*amarillo*), acinos pancreáticos (*lila*), matriz extracelular (*rosa/blanco*), músculo (*verde*) e islote de Langerhans (*azul claro*). Estos mapas permiten entender qué estructuras se encuentran alrededor del tumor y cómo estas cambian de un páncreas sano a uno canceroso, lo cual nos puede dar muchísima información sobre cómo se está expandiendo el tumor y cuál es la mejor manera de tratarlo.

el espacio nos permitirá validar las interacciones actuales y explorar otras nuevas».

Hasta aquí algunas de las primeras aplicaciones de la transcriptómica espacial. Aunque ya está cosechando hallazgos biológicos y biomédicos de gran relevancia, se trata de un campo muy nuevo. Se halla todavía en sus etapas más iniciales y, por tanto, deberá superar varios retos, experimentales y computacionales, antes de llegar a la madurez.

Retos experimentales

El principal problema experimental al que se enfrenta esta nueva estrategia radica en conseguir un buen compromiso entre sensibilidad y escalabilidad. Algunos métodos, como la hibridación in situ y la secuenciación in situ, son muy sensibles (ofrecen una alta resolución y una precisión de unos pocos centenares de transcritos) pero admiten fragmentos de tejido de tamaño reducido. Otros, en cambio, como la captura in situ, permiten abarcar superficies más extensas y detectar más transcritos diferentes, pero con una sensibilidad muy inferior y una resolución de solo entre 2 y 10 células.

Para poder trabajar con muestras de mayor tamaño, pero sin renunciar a una buena resolución y sensibilidad, será necesario refinar todavía más los instrumentos. En el caso de los métodos basados en la hibridación y la secuenciación in situ, necesitaremos microscopios con campos de visión más amplios y más sensibles. La incorporación de robots que automaticen el procesamiento de los cortes de tejidos y la captura de imágenes también es esencial, ya que así podemos eliminar el componente humano (propenso al error en tareas repetitivas) y aumentar la cantidad de información obtenida.

Para los métodos basados en la captura in situ de los transcritos, los principales retos son dos: alcanzar niveles de resolución subcelulares y aumentar la sensibilidad. El primero parece que está casi resuelto, ya que se espera que a lo largo de los próximos meses lleguen al mercado productos que ofrecerán una resolución subcelular (como Visium HD, de 10XGenomics, y Stereo-seq, de BGI-Shenzhen). Para el segundo (mejora de la sensibilidad) necesitaremos desarrollar protocolos que optimicen la captura de los transcritos.

En cuanto a la integración de diferentes modalidades de datos ómicos, ya se ha dado el primer paso con métodos como DBiT-seq. Pero para poder explotar el potencial de la transcriptómica espacial hacen falta métodos mucho más eficientes y fáciles de implementar. Solo así podrá generalizarse su uso.

Retos computacionales

El análisis de los datos que arroja la transcriptómica espacial entraña una gran complejidad computacional. Por un lado, requiere una gran potencia de cálculo. Los datos son tan abundantes e intrincados (macrodatos) que los algoritmos clásicos en genómica no sirven. Necesitamos nuevas herramientas que nos permitan procesar toda esta información.

Por otro lado, debido a las limitaciones técnicas previamente mencionadas, la información con la que contamos se halla disgregada. Para cada corte de tejido, tenemos una imagen y un conjunto de datos transcriptómicos. Integrar las imágenes con los datos correspondientes constituye un gran reto, que requerirá el desarrollo de métodos de inteligencia artificial que nos permitan interpretarlos conjuntamente. Pensemos en un sistema de redes neuronales artificiales que pudiera reconocer estructuras del tejido y descomponer la imagen en patrones repetitivos. Mediante la asociación de estos rasgos característicos con un perfil transcriptómico específico obtendríamos un «mapa» tisular de gran interés para el histopatólogo, puesto que le ayudaría a la hora de realizar un diagnóstico.

Entre los equipos de investigación que están avanzando en este camino de integrar datos procedentes de distintos métodos y enfoques, destacan el de Rahul Satija, del Centro Genómico de Nueva York, y el de Fabian Theis, del Instituto de Biología Computacional Helmholtz de Múnich.

En nuestro grupo, estamos trabajando en la integración de diferentes técnicas «de célula única» con la transcriptómica espacial. El objetivo es aprovechar toda la información ya existente y observarla directamente sobre el espacio, y así poder entender qué procesos están activados a nivel molecular. Por ejemplo, si logramos mapear tipos de células inmunitarias en un corte de tejido tumoral, sabremos qué poblaciones hay y si estas pueden infiltrar el tumor y atacar a las células tumorales. Para Juan C. Nieto, experto en inmuno-oncología del Centro Nacional de Análisis Genómico del Centro de Regulación Genómica (CNAG-CRG), la posibilidad de entender el componente espacial de los tumores y el modo en que se organiza el sistema inmunitario en respuesta a las células tumorales «nos permitirá encontrar una aguja en un pajar».

Por último, uno de los retos con mayor potencial en este campo es la reconstrucción computacional en 3D de tejidos analizados mediante transcriptómica espacial. Poder reconstruir estos tejidos y observarlos en 3D nos permitirá obtener una visión holística de estos, tanto a nivel estructural como a nivel molecular.

A medida que los investigadores vayan perfeccionando los métodos, los protocolos experimentales y las herramientas computacionales, podremos refinar la interpretación de estos datos, lo cual nos permitirá caracterizar con mayor detalle toda la heterogeneidad presente en los tejidos y capturar todos los matices. Ello nos abrirá la puerta a estudiar la compleja vida de las células, las interacciones con el medio y entre ellas, y el modo en que estas relaciones determinan la evolución del tejido. Comprender estos procesos en el tejido sano y en el enfermo servirá para dilucidar qué alteraciones derivan en enfermedad y, por ende, determinar qué tratamiento es el más adecuado para cada situación.

Marc Elosua Bayés es estudiante de doctorado en el Grupo de Biomedicina y Transcriptómica de Células Individuales en el Centro Nacional de Análisis Genómico del Centro de Regulación Genómica (CNAG-CRG), en Barcelona.



PARA SABER MÁS

Integrating microarray-based spatial transcriptomics and single-cell RNA-seq reveals tissue architecture in pancreatic ductal adenocarcinomas. Reuben Moncada et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 38, págs. 333-342, enero de 2020.

Spatially resolved transcriptomes-next generation tools for tissue exploration. Michaela Asp, Joseph Bergenstråhle y Joakim Lundeberg en *Bioessays*, vol. 42, n.º 10, octubre de 2020.

Method of the year: Spatially resolved transcriptomics. Vivien Marx en *Nature Methods*, vol. 18, págs. 9–14, enero de 2021.

A spatially resolved brain region- and cell type-specific isoform atlas of the postnatal mouse brain. Anoushka Joglekar et al. en *Nature Communications*, vol. 12, artículo 463, enero de 2021.

Exploring tissue architecture using spatial transcriptomics. Anjali Rao et al. en *Nature*, vol. 596, págs. 211–220, agosto de 2021.

Museum of spatial transcriptomics. Lambda Moses y Lior Pachter en *Nature Methods* , vol. 19, págs. 534–546, mayo de 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Secuenciación de células individuales. Kelly Rae Chi en *IyC*, abril de 2014.

Una visión más nítida de los secretos celulares. Maria Colomé Tatché en *IyC*, septiembre de 2020.



Detector de CMS, uno de los cuatro experimentos principales del LHC.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

LA TERCERA OPORTUNIDAD DEL LHC

Elizabeth Gibney | El Gran Colisionador de Hadrones se ha vuelto a poner en marcha, y las esperanzas de que realice un descubrimiento revolucionario son mayores que nunca

MICHAEL HOCH, MAXIMILIEN BRICE/CERN

La búsqueda de nueva física ha tornado a comenzar. El acelerador de partículas más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), se ha puesto en marcha otra vez después de una parada técnica de más de tres años. Los haces de protones vuelven a viajar a toda velocidad por el túnel circular de 27 kilómetros del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, situado cerca de Ginebra. En julio, los físicos podrán retomar sus experimentos y observar cómo esos haces chocan entre sí.

En sus dos primeras fases de funcionamiento (de 2009 a 2013 y de 2015 a 2018), el LHC exploró el mundo físico conocido. Todo ese trabajo, incluido el triunfal descubrimiento del bosón de Higgs en julio de 2012, sirvió para apuntalar el modelo estándar, la mejor teoría que poseen los físicos para describir las partículas y fuerzas que conforman el universo. Pero el análisis de miles de billones de colisiones de alta energía aún no ha aportado pruebas de ninguna nueva partícula inesperada ni de fenómenos completamente desconocidos.

Esta vez podría ser diferente. La tercera versión del LHC (cuya construcción ya ha costado unos 8700 millones de euros, si incluimos las últimas actualizaciones) comportará más datos, mejores detectores y formas innovadoras de buscar nueva física. Además, los científicos cuentan con una prometedora lista de resultados anómalos —muchos más que al comienzo del ciclo anterior— que dan pistas sobre dónde buscar partículas no incluidas en el modelo estándar.

«Empezamos con la adrenalina por las nubes», comparte Isabel Pedraza, física de partículas en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. «Estoy segura de que veremos algo en esta tercera etapa.»

Más energía y más datos

Tras la renovación de sus aceleradores de partículas, la tercera versión del LHC hará chocar protones a 13,6 billones de electronvoltios (TeV), una energía ligeramente mayor que la del segundo período, en el que se alcanzaron los 13 TeV. Según Rende Steerenberg, que dirige las operaciones con haces en el CERN, eso hará que aumenten las posibilidades de crear partículas en las regiones de alta energía donde algunas teorías sugieren que podríamos descubrir nueva física. Además, los haces de protones estarán formados por paquetes más compactos, con lo que las colisiones serán más probables. Gracias a eso, el LHC será capaz de mantener durante más tiempo su ritmo máximo de colisiones por segundo, y los experimentos registrarán tantos datos como en las dos primeras fases juntas.

A fin de lidiar con la avalancha de datos, se han renovado los detectores del instrumento (capas de sensores que atrapan las partículas producidas en las colisiones y miden su energía, su momento y otras propiedades) para hacerlos más eficientes y precisos.

Los investigadores del LHC siempre se han enfrentado a un gran reto, y es que solo pueden almacenar una mínima parte de los datos de las colisiones. El instrumento hace chocar paquetes de partículas 40 millones de veces por segundo, y cada colisión entre dos protones (lo que se denomina un «evento») puede generar cientos de partículas. Los sistemas de selección de eventos (*triggers*) deben elegir los más interesantes y desechar el resto. Por ejemplo, en CMS, uno de los cuatro experimentos principales del LHC, un sistema de selección integrado en los componentes evalúa la energía de las partículas y otras propiedades para hacer una primera criba de unos 100.000 eventos por segundo. A continuación, el programa informático elije unos 1000 de ellos, que se reconstruirán por completo para su análisis.

Con más datos, los sistemas de selección de eventos tendrán aún más trabajo. Una de las nuevas mejoras consiste en el uso de unos chips originalmente diseñados para los videojuegos, las llamadas unidades de procesamiento gráfi-

EN SÍNTESIS

En los últimos tres años, se han realizado grandes mejoras en los aceleradores, detectores y sistemas electrónicos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.

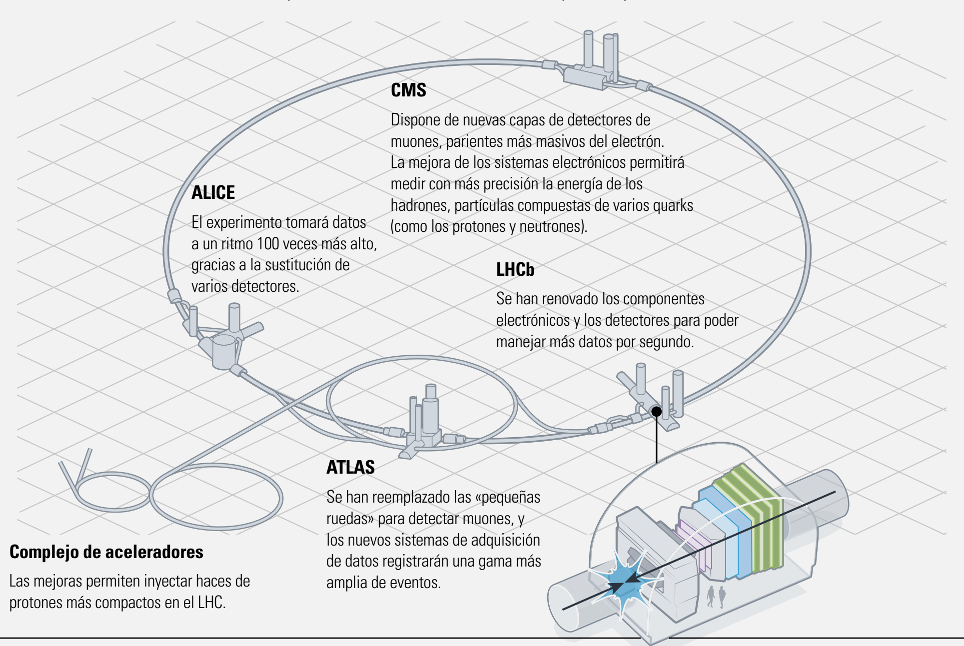
Los investigadores del LHC retoman sus experimentos este julio, con la esperanza de hallar «nueva física»: partículas o fenómenos que no tengan cabida en el modelo estándar.

Para ello explorarán varios resultados anómalos que se han ido acumulando, a fin de comprobar si son auténticos hallazgos o meras fluctuaciones estadísticas.

El aprendizaje automático podría facilitar la búsqueda, por ejemplo, ayudando a distinguir las colisiones entre el ruido de fondo o a seleccionar los eventos de interés.

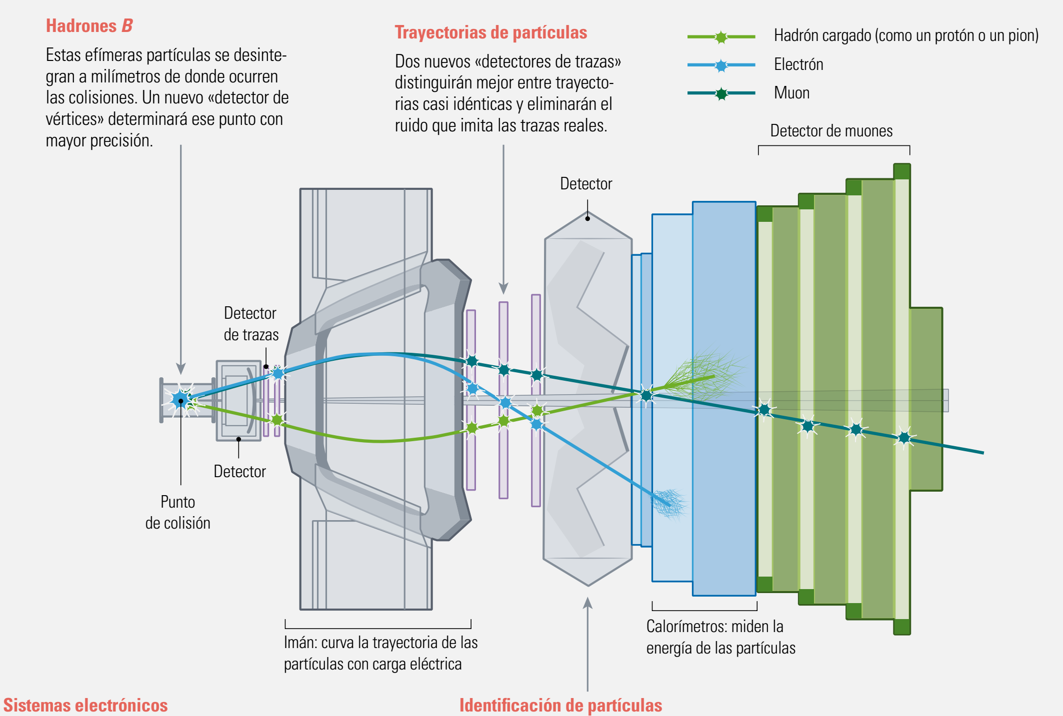
MUCHOS MÁS DATOS

En la tercera tanda de experimentos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), los investigadores esperan registrar tantos datos sobre choques de partículas como en las dos tandas anteriores juntas. Eso se debe, en parte, a que los haces de partículas que circularán por el anillo serán más estables y compactos, con lo que habrá más colisiones. También se explica por las mejoras en los cuatro principales detectores del acelerador: CMS, ATLAS, ALICE y LHCb. Este último se ha renovado por completo.



Mejores detectores

El experimento LHCb se ha actualizado por completo para la tercera fase de operaciones. Esta vista superior muestra cómo detecta las partículas generadas en las colisiones, así como las mejoras realizadas en sus detectores y sistemas electrónicos.



Sistemas electrónicos

Ahora, el LHCb puede usar *software* para examinar 40 millones de eventos por segundo. Antes, un filtro integrado en los componentes seleccionaba un millón de esos eventos para su análisis.

Identificación de partículas

Otros detectores miden la velocidad de las partículas cargadas. A partir de esa información y de la trayectoria, es posible identificar la partícula. Los nuevos detectores son más sensibles a la velocidad y pueden manejar más datos por segundo.

FUENTE: CERN; NIK SPENCER/*NATURE*

co (GPU, por sus siglas en inglés). Las GPU tardan menos que los procesadores habituales en reconstruir la historia de las partículas, así que el programa podrá realizar su análisis más rápido y evaluar más criterios por segundo. Eso le dará la oportunidad de detectar colisiones extrañas que antes podrían haber pasado desapercibidas.

En particular, el experimento LHCb ha actualizado los sistemas electrónicos de su detector, de forma que la selección de eventos se hará exclusivamente mediante un programa informático. Con las mejoras introducidas en todo el experimento, se espera que pueda recoger cuatro veces más datos en este tercer período que en el segundo. «Es casi como un detector nuevo», destaca Yasmine Amhis, física del Laboratorio Irène Joliot-Curie de Orsay que participa en la colaboración LHCb.



MAXIMILIEN BRICE, JULIEN MARIUS ORDAN/CERN

El detector de vértices del experimento LHCb está situado cerca del punto de colisión para observar partículas de vida corta.

La esperanza de las anomalías

Según Ludovico Pontecorvo, físico del experimento ATLAS, durante este tercer ciclo los físicos podrán realizar mediciones más precisas de algunas partículas conocidas, como el bosón de Higgs. Eso ya podría arrojar resultados que entren en conflicto con las teorías actuales: por ejemplo, al reducirse las barras de error, algunas medidas podrían dejar de ser compatibles con las predicciones del modelo estándar.

Pero los físicos también quieren averiguar si una serie reciente de observaciones extrañas constituyen auténticas anomalías, lo que podría ayudar a llenar ciertas lagunas en nuestra comprensión del universo. El modelo estándar parece incompleto, pues no es capaz de explicar aspectos como, por ejemplo, la materia oscura. Y en los últimos dos años han aparecido varios resultados que no encajan con el modelo, aunque aún no son lo bastante firmes como para poder asegurar que existe una discrepancia.

El último de ellos proviene del colisionador Tevatrón, que estuvo en funcionamiento hasta 2011 en el Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), cerca de Chicago. Los investigadores se han pasado el último decenio analizando los datos del experimento CDF del Tevatrón. Este abril, anunciaron que la masa del bosón *W*, una de las partículas fundamentales que transmiten la interacción débil (implicada en las desintegraciones radioactivas), es significativamente mayor de lo que predice el modelo estándar.

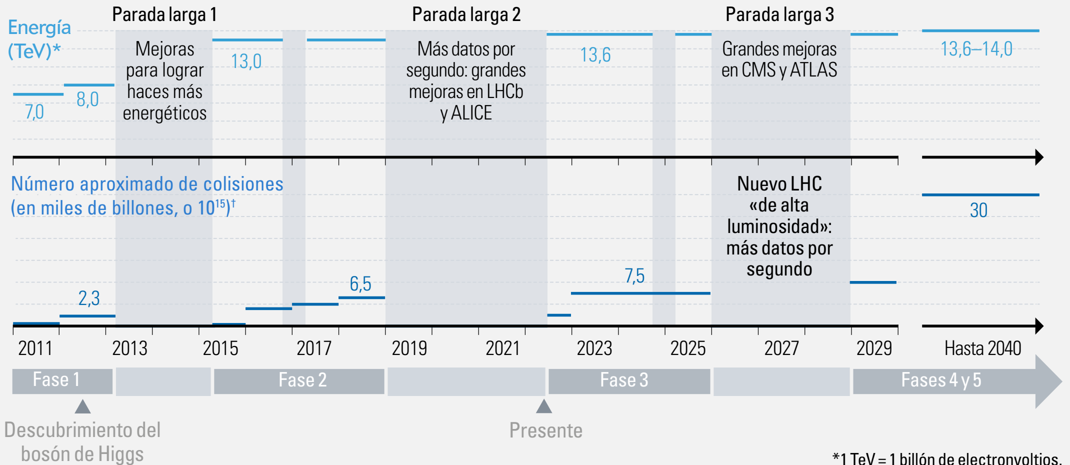
Eso no está en consonancia con los datos del LHC: las mediciones de los experimentos ATLAS y LHCb no concuerdan con el resultado de CDF, si bien son menos precisas. Los físicos de CMS aún están realizando su propio cálculo a partir de los datos de la segunda fase de operaciones del LHC. Esta tercera etapa podría proporcionar una respuesta definitiva, aunque no llegará de inmediato, porque medir la masa del bosón *W* es notoriamente difícil.

Confusión en torno al mesón *B*

Los datos del LHC han revelado indicios de otras anomalías. Una de ellas se refiere al comportamiento de los mesones *B*, unas partículas efímeras que enseguida se descomponen en otras, y que se llaman así porque contienen un quark *belleza* (*b*, también conocido como *fondo* o *bottom*). A lo largo de casi una década, LHCb ha acumulado pruebas de que la desintegración de los mesones *B* tiende a producir electrones más a menudo que muones (partículas similares al electrón, pero más masivas). Sin embargo, el modelo estándar predice que la naturaleza no

CRONOLOGÍA DEL LHC

Entre 2026 y 2029 se volverá a actualizar el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) para aumentar aún más la frecuencia y la energía de las colisiones. Después, se prevé que siga funcionando diez años más.



*1 TeV = 1 billón de electronvoltios.
†Calculado a partir de la luminosidad integrada del LHC (un femtobarn inverso ~ 100 billones de colisiones protón-protón). A partir de 2023: expectativas del diseño.

FUENTE: CERN; NIK SPENCER/*NATURE*

debería tener ninguna preferencia entre unos y otros, apunta Tara Shears, física de partículas en la Universidad de Liverpool e integrante de la colaboración LHCb. «La producción de muones es un 15 por ciento menos frecuente que la de electrones, y eso es rarísimo.»

La desviación con respecto a las predicciones del modelo estándar es de unas 3 sigmas, lo cual implica que la probabilidad de que el aparente sesgo sea producto del ruido aleatorio es del 3 por mil. Pero se precisan más datos para confirmar si el efecto es real o se trata de una mera fluctuación estadística. Podría haberse producido algún error a la hora de interpretar el experimento, pero, ahora que se han sustituido muchos de los principales detectores de LHCb, la siguiente fase de recogida de datos debería sacarnos de dudas, comenta Shears. «Si [la anomalía] desaparece, será una decepción. Pero así es la vida del científico, es algo que puede pasar.»

La anomalía cuenta con el respaldo de discrepancias similares que LHCb ha encontrado en otras desintegraciones relacionadas con quarks *b*; y algunos experimentos en colisionadores de Japón y Estados Unidos también han hallado indicios de este extraño fenómeno. Este tipo de trabajo es la especialidad de LHCb: sus detectores se diseñaron para estudiar en detalle la desintegración de partículas que contienen quarks pesados y obtener así información indirecta sobre los procesos que influyen en el comportamiento de esas partículas. CMS y ATLAS son experimentos con un propósito más general, pero se está estudiando cómo lograr que detecten más eventos sensibles a las anomalías, apunta Florencia Canelli, física de partículas de la universidad de Zúrich que forma parte de la colaboración CMS.

En busca del leptoquark

CMS y ATLAS también harán algo que no está al alcance de LHCb: buscar directamente en los datos de las colisiones las partículas exóticas que, según los teóricos, podrían estar causando las anomalías. Una de esas partículas hipotéticas es el «leptoquark», llamado así porque exhibiría propiedades de dos familias distintas de partículas: los leptones (como los electrones y los muones) y los quarks. Esta partícula híbrida aparece en teorías que tratan de unificar las interacciones electromagnética, débil y fuerte como aspectos de una misma fuerza, y podría explicar los resultados de LHCb. El leptoquark (o una versión compleja de él) también encaja con otra intrigante anomalía: una medición realizada el año pasado en el experimento Muon $g-2$ del Fermilab, que sugiere que los muones son más magnéticos de lo esperado.

El pasado marzo, en los Encuentros de Moriond (una conferencia de física de partículas que se celebra cada año en la localidad italiana de La Thuile), los físicos de CMS presentaron signos de la existencia de un leptón más allá del modelo estándar. Esta partícula es una predicción de algunas teorías de leptoquarks e interactuaría con ellos. Lo que vieron los investigadores fue un ligero exceso de las partículas en las que ese leptón podría descomponerse, quarks *b* y tauones (parientes más pesados del muon), aunque la significación estadística es de tan solo 2,8 sigmas. «Son resultados muy emocionantes, ya que LHCb está observando algo similar», valora Pedraza. Los físicos de CMS también anunciaron en la conferencia indicios de otros nuevos fenómenos: dos partículas que se descompondrían en tauones y otra partícula de alta energía que, a través de una ruta de desintegración hipotética, daría lugar a unos característicos chorros de partículas denominados *jets*.

Otro resultado intrigante proviene del experimento ATLAS, donde Ismet Siral, de la Universidad de Oregón, y sus colaboradores buscaron hipotéticas partículas masivas, cargadas y de vida larga. Entre los datos de billones de colisiones registrados a lo largo de tres años, hallaron 7 posibles candidatas con una energía cercana a los 1,4 TeV, unas 8 veces mayor que la de la partícula más pesada conocida hasta la fecha. Estos resultados tienen una significación estadística de 3,3 sigmas, y la identidad de las supuestas partículas todavía es un misterio. «No sabemos si es real, necesitamos más datos. Y ahí es donde entra el tercer ciclo del LHC», recalca Siral.

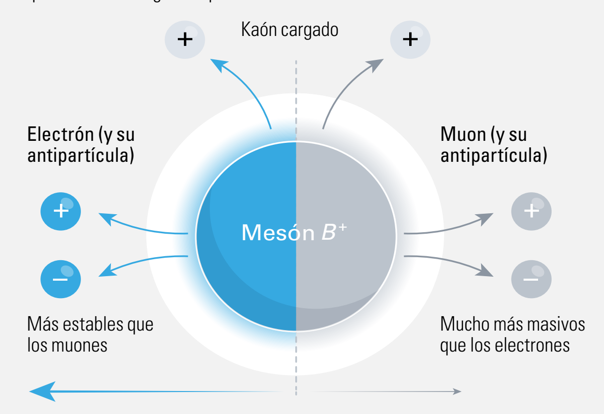
ALICE, otro experimento del LHC, examinará su propio hallazgo sorprendente: el hecho de que las condiciones extremas creadas en las colisiones entre iones de plomo (con los que trabaja el LHC cuando no está usando protones) también podrían darse en otras situaciones. ALICE está diseñado para estudiar el plasma de quarks y gluones, una sopa de partículas caliente y densa que emerge de los choques entre iones pesados, y que posiblemente permeaba todo el universo justo después de la gran explosión. El análisis de los datos obtenidos en las dos fases previas del LHC sugiere que los productos

¿INDICIOS DE NUEVA FÍSICA?

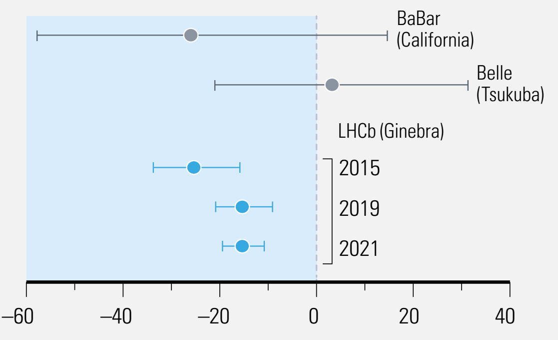
Algunas anomalías recientes entran en conflicto con el modelo estándar, pero aún no son lo bastante firmes para considerarlas descubrimientos.

La anomalía del mesón *B*

El mesón B^+, una partícula efímera, puede desintegrarse de dos formas que deberían ser igual de probables.

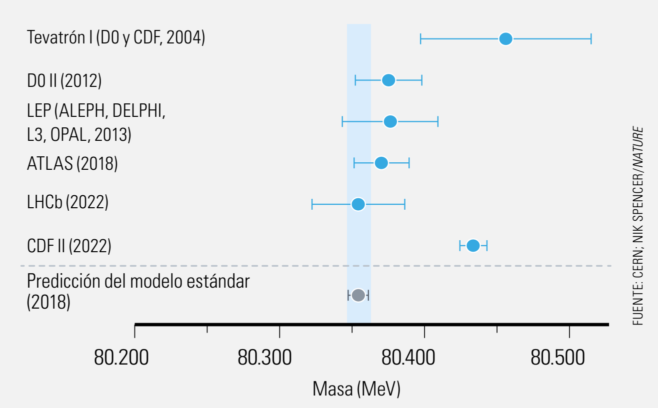


El detector LHCb ha observado que la desintegración en electrones es un 15 por ciento más frecuente que la que produce muones. Eso sugiere la influencia de partículas más allá del modelo estándar. A continuación, se comparan los resultados de LHCb con los de otros experimentos.



El misterio del bosón *W*

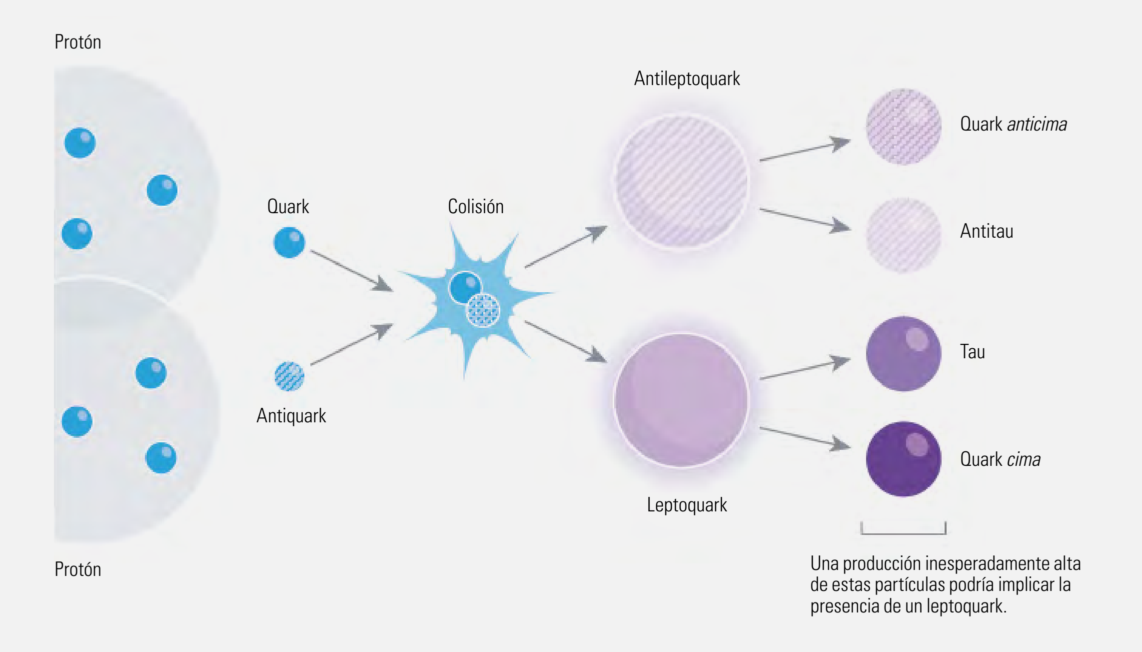
El último análisis de datos del detector CDF del Tevatrón (un colisionador de EE.UU.) concluye que la masa del bosón *W* es mayor de lo que predice el modelo estándar. Casi todos los demás experimentos discrepan.



FUENTE: CERN; NIK SPENCER/*NATURE*

DESCIFRAR LAS DESINTEGRACIONES

Los físicos podrían inferir la presencia de partículas masivas de vida corta si detectan las partículas más estables en las que se descomponen. Por ejemplo, este es un modo en que el «leptoquark» —una hipotética partícula efímera que presenta propiedades de los leptones (como los electrones) y los quarks— podría producirse y desintegrarse.



de las colisiones protón-protón y protón-ion de plomo también muestran algunos rasgos de ese estado de la materia, como trayectorias que están relacionadas en vez de ser aleatorias. «Es un fenómeno muy interesante e inesperado», afirma Barbara Erazmus, portavoz adjunta de ALICE en el CERN.

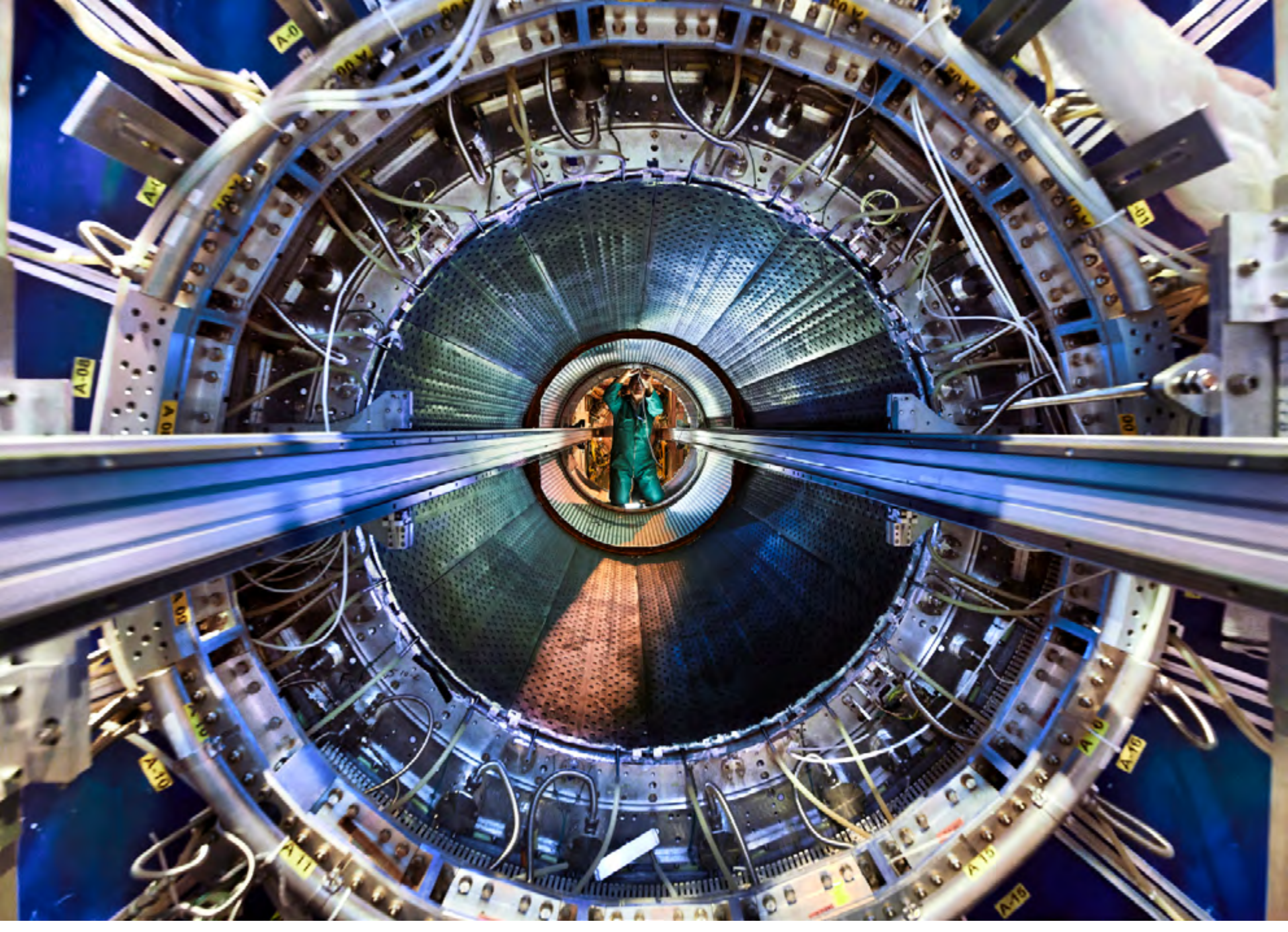
Al igual que LHCb, ALICE ha sido objeto de una importante renovación, que incluye la puesta al día de los componentes electrónicos para implementar un sistema de selección de eventos más rápido, basado solo en el *software*. El experimento, que medirá con precisión la temperatura del plasma y estudiará la distribución de partículas que contienen quarks *encanto* (*c* o *charm*) y *belleza*, podrá recoger 100 veces más eventos que en sus dos etapas anteriores gracias a las mejoras en sus detectores.

El papel del aprendizaje automático

La tercera fase de operaciones del LHC también tendrá experimentos completamente nuevos. Es el caso de FASER, situado a medio kilómetro de ATLAS, que buscará partículas ligeras y que interactúen débilmente, como los neutrinos, y nuevos fenómenos que pudieran explicar la materia oscura. (ATLAS no es capaz de registrar esas partículas porque, tras la colisión, seguirían una trayectoria muy próxima a la del haz y eludirían los detectores.)

Por su parte, los experimentos ATLAS y CMS ahora tienen mejores detectores, pero no recibirán nuevos componentes hasta la próxima gran parada, en 2026. Entonces, se reacondicionará el LHC para producir haces más concentrados, llamados «de alta luminosidad», que comenzarán a circular en 2029. Eso permitirá que en las siguientes fases se recojan 10 veces más datos que en las tres primeras juntas. Por el momento, CMS y ATLAS cuentan con prototipos tecnológicos que les ayudan a prepararse.

Además de registrar más eventos, Siral y otros físicos pretenden cambiar la manera de rastrear partículas en el LHC. Hasta ahora, gran parte de la investigación del colisionador ha consistido en poner a prueba predicciones concretas (como cuando buscó el bosón de Higgs allí donde los físicos esperaban encontrarlo) o explorar deter-



Los detectores del experimento ALICE se han renovado durante la parada que el Gran Colisionador de Hadrones ha realizado entre 2018 y 2022.

MAXIMILIEN BRICE, JULIEN MARIUS ORDAN/CERN

minadas hipótesis relacionadas con la existencia de nueva física.

Los científicos pensaban que esa estrategia daría sus frutos, porque tenían bastante claro lo que buscaban. Muchos confiaban en descubrir nuevas partículas masivas, como las que predicen las «teorías supersimétricas», al poco de ponerse en marcha el LHC. Pero no han hallado ninguna, lo cual descarta todas las versiones de la supersimetría, salvo las más enrevesadas. Hoy en día, no parece haber ninguna extensión teórica del modelo estándar que tenga más probabilidades de ser válida que el resto.

Ahora, se están adoptando enfoques menos condicionados por las expectativas. Por ejemplo, tanto ATLAS como CMS buscarán partículas de vida larga con un amplio abanico de posibles propiedades. Para Siral, cambiar la estrategia de búsqueda a menudo conlleva escribir programas informáticos de análisis que no se apoyen en las hipótesis habituales.

El aprendizaje automático también podría ser de ayuda. Muchos experimentos del LHC ya recurren a esta técnica para distinguir ciertas colisiones de interés, separándolas del ruido de fondo. Se trata de un aprendizaje «supervisado»: el algoritmo recibe un patrón que debe buscar. Pero cada vez es más frecuente el uso de algoritmos de aprendizaje automático no supervisado, capaces de hallar anomalías en un contexto amplio, sin expectativas. Por ejemplo, una red neuronal puede aprender una simulación del modelo estándar y emplearla para contrastar eventos. Si la simulación no logra recrear el evento, entonces se trata de una anomalía. Aunque esta estrategia todavía no se utiliza de forma sistemática, «creo que se avanzará en esa dirección», opina Sascha Caron, de la Universidad Radboud de Nimega, que trabaja en la aplicación de estos métodos a los datos de ATLAS.

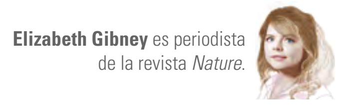
Los sistemas de selección de eventos son cruciales para conseguir que la búsqueda sea menos sesgada, así que resulta muy conveniente que las nuevas GPU puedan usar criterios más amplios al examinar los eventos. CMS también empleará una técnica llamada *scouting*, que consiste en

analizar reconstrucciones parciales de los cerca de 100.000 eventos seleccionados inicialmente. «Es el equivalente a 10 años de funcionamiento del detector, pero en un solo año», asegura Andrea Massironi, físico del experimento CMS.

Los propios sistemas de selección podrían empezar pronto a basarse en el aprendizaje automático para tomar sus decisiones. Como prueba de concepto, Katya Govorkova, física de partículas en el CERN, y sus colaboradores han ideado un algoritmo de alta velocidad que usa el aprendizaje automático para elegir cuáles de los 40 millones de eventos por segundo almacenar, en función de su encaje con el modelo estándar. En esta tercera etapa del LHC, los investigadores tienen previsto entrenar y poner a prueba el algoritmo con las colisiones de CMS, empleándolo junto al sistema de selección habitual del experimento. El algoritmo puede etiquetar ciertos eventos como anómalos, pero aún no indica el motivo exacto por el que lo son, así que decidir cómo analizar esas colisiones supondrá un reto, apunta Govorkova.

Los físicos aún no saben dónde podrían hallar el rastro que los conduzca a una teoría más allá del modelo estándar, así que deben mantener la mente abierta, opina Amhis. Aunque el cúmulo actual de anomalías es esperanzador, otros fenómenos extraños observados en el pasado (incluso por más de un experimento) resultaron ser fluctuaciones estadísticas que se desvanecieron al obtener más datos. «Es importante seguir explorando todas las posibilidades», concluye Amhis. «Se trata de no jugárselo todo a una sola carta.»

Elizabeth Gibney es periodista de la revista *Nature.*



Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group© 2022.

PARA SABER MÁS

Medir la belleza. Guy Wilkinson en *IyC*, enero de 2018.

El LHC sigue viendo indicios de nueva física. Daniel Garisto en *IyC*, mayo de 2021.

El misterio del muon. Lucius Bushnaq, Gregorio Herdoíza y Marina Krstić Marinković en *IyC*, junio de 2021.

Una nueva manera de acelerar partículas. Chandrashekhar Joshi en *IyC*, septiembre de 2021.

Una discrepancia inesperada en la masa del bosón *W*. Daniel Garisto en www.investigacionyciencia.es, 27 de mayo de 2022.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza
Javier Grande Bardanca
Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO, TRADUCCIÓN Y EDICIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, El semiletargo del colibrí* y *Apiwtxa, maestros de la sostenibilidad* (ed.); **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes* y *La carrera por reciclar dióxido de carbono* (trad.); **Miguel A. Vázquez-Mozo:** *Corrección de errores cuánticos;* **Anna Romero:** *Parásitos amenazados*; **Lorenzo Gallego:** *Apiwtxa, maestros de la sostenibilidad* (trad.); **Alfredo Marcos:** *Las múltiples caras de la ciencia ciudadana*; **Gonzalo Claros:** *Hablemos de sexo (biológico);* **Guillem Pérez Nadal:** *La tercera oportunidad del LHC;* **Fabio Teixidó:** *La carrera por reciclar dióxido de carbono* (ed.).

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

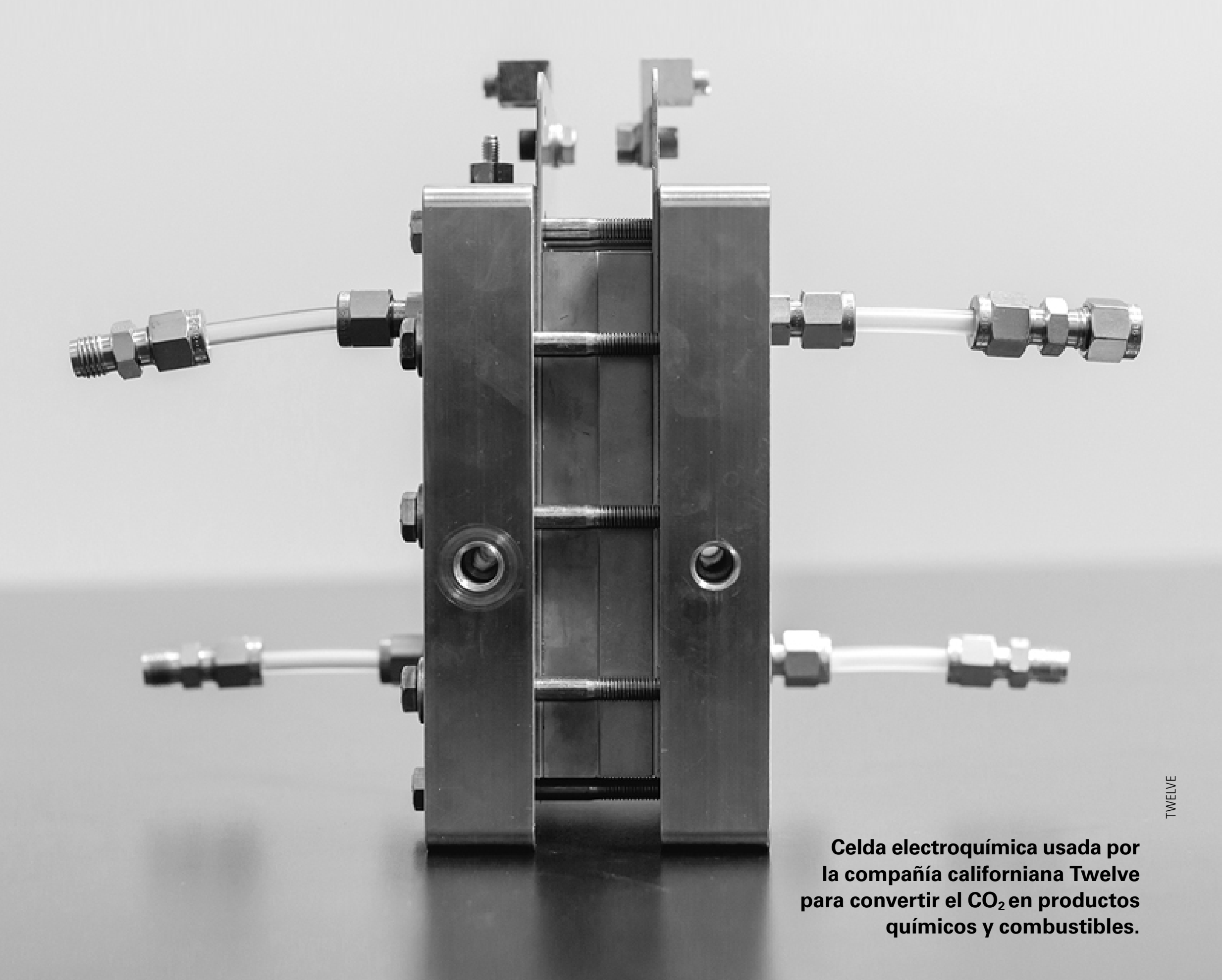
La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

LA CARRERA POR RECICLAR EL DIÓXIDO DE CARBONO

Mark Peplow | Distintas empresas se afanan por convertir el CO_2 en productos útiles, aunque existen dudas sobre los beneficios climáticos de esta estrategia



TWELVE

Celda electroquímica usada por la compañía californiana Twelve para convertir el CO_2 en productos químicos y combustibles.

La ciudad de Tongyezhen lleva el carbón en la sangre. En esta zona de la provincia china de Henan, la gente lleva milenios extrayendo carbón y fundiendo metales. Hoy, Tongyezhen alberga un extenso parque industrial con enormes hornos que transforman el carbón y la piedra caliza en coque y cal, componentes clave en la producción del acero. No es de extrañar, por tanto, que sea una de las áreas más contaminadas de China.

No parece el lugar más indicado para encontrar un hito de la tecnología limpia. Sin embargo, una planta química local se convertirá este año en la mayor instalación del mundo de reciclaje de dióxido de carbono para producir combustible. En ella se combinará el CO_2 procedente de un horno de cal con el hidrógeno y el CO_2 liberados por un horno de coque a fin de obtener metanol, un compuesto industrial que se emplea como combustible y en la fabricación de plásticos. La empresa responsable, la islandesa Carbon Recycling International (CRI), calcula que en la planta de Tongyezhen se reciclarán unas 160.000 toneladas de CO_2 al año (el equivalente a las emisiones de decenas de miles de automóviles), que de otro modo se verterían a la atmósfera.

Es una idea atractiva. Las emisiones industriales de CO_2 provocan el calentamiento del clima, y muchos países se esfuerzan por capturar el gas y almacenarlo bajo tierra. Pero ¿por qué no reciclarlo para obtener productos que, además de limpios, sean rentables? Siempre y cuando el reciclaje no genere más emisiones de carbono (algo que puede lograrse haciendo uso de energías renovables o recursos sobrantes que ahora mismo no se aprovechan), podría reducir tanto la cantidad de CO_2 que la industria inyecta en la atmósfera como la demanda de combustibles fósiles empleados en los procesos de fabricación. Para los defensores de esta propuesta, el clima saldría ganando por partida doble.

Ese tipo de reciclaje (en ocasiones denominado «suprarreciclaje») conforma un campo cada vez más popular, con grandes y pequeñas empresas que compiten por comercializar una abrumadora gama de productos obtenidos a partir del CO_2. Algunos, como el vodka o los diamantes, son artículos selectos dirigidos a compradores concienciados con el clima, pero la mayoría resultan esenciales para la economía mundial: combustibles, materiales de construcción, polímeros y

EN SÍNTESIS

A medida que el planeta se calienta, surgen nuevas técnicas para reciclar el dióxido de carbono (CO_2) y obtener productos químicos útiles, aunque no está claro si estas iniciativas suponen un verdadero beneficio climático.

Existe un debate en torno a la conveniencia de aprovechar el CO_2 procedente de emisiones industriales frente a confinarlo en el subsuelo, un proceso más costoso pero con beneficios más evidentes.

La mejora de los procesos químicos y los incentivos a la retirada de carbono rebajan el coste de las nuevas técnicas y fomentan la conversión del CO_2 en productos de consumo.

otros productos químicos. Más de 80 empresas están desarrollando nuevas formas de utilizar el CO_2, según señala en un informe de 2021 la consultora Lux Research, con sede en Boston. El mercado de tales productos aún es modesto y no llega a los 1000 millones de dólares, pero Lux Research estima que alcanzará los 70.000 millones de dólares para 2030 y podría superar los 550.000 millones en 2040.

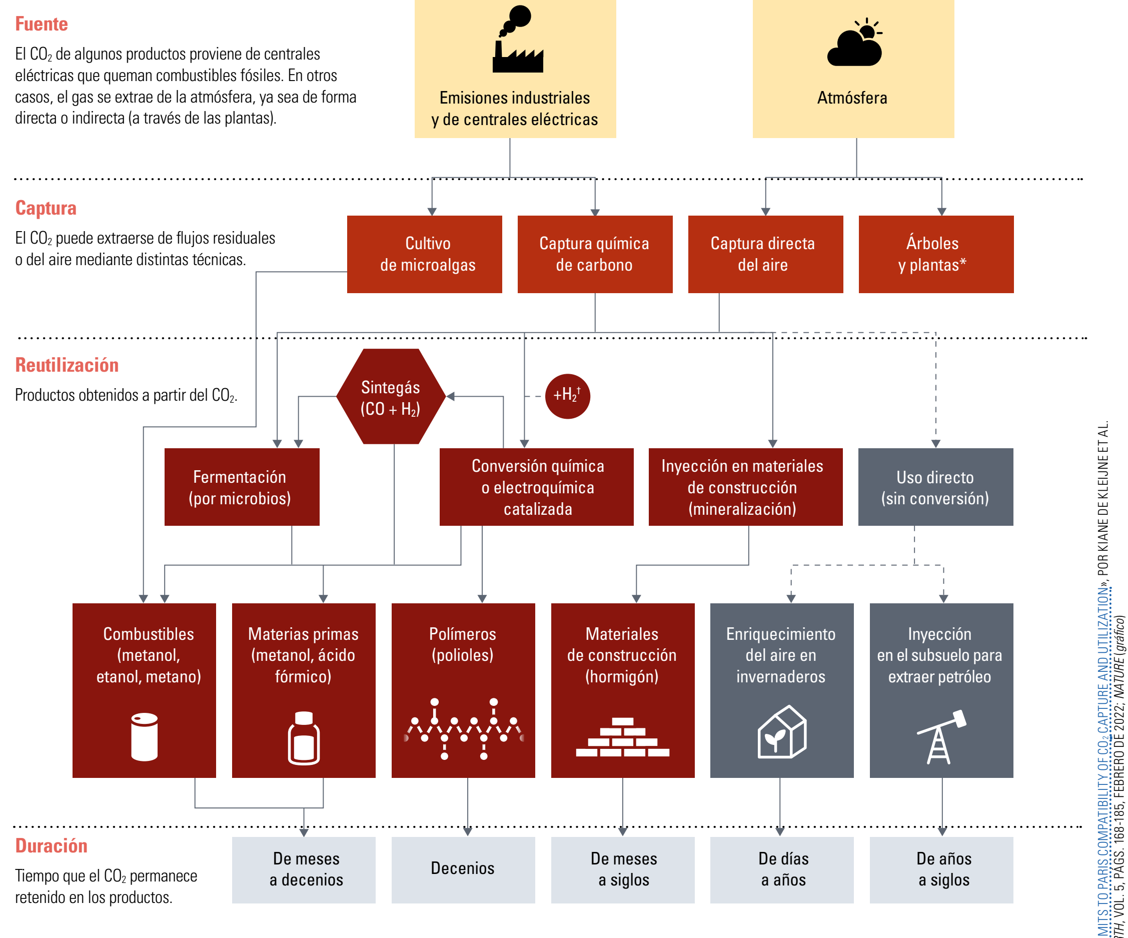
Esas iniciativas se ven impulsadas por un descenso en el coste de las energías renovables, así como por los mayores impuestos al carbono y otros incentivos climáticos que persuaden a las empresas para evitar las emisiones de CO_2. Al mismo tiempo, los químicos han mejorado la eficiencia de las técnicas subyacentes.

No obstante, existen serias dudas sobre si el reciclaje de CO_2 supone un beneficio climático real. Muchos de los productos resultantes solo retrasan ligeramente la incorporación del carbono a la atmósfera: los combustibles se queman, los compuestos químicos se degradan y el CO_2 empleado para crearlos se libera de nuevo. Lo mismo ocurrirá en Tongyezhen, ya que buena parte del metanol producido se destinará a abastecer la creciente flota china de vehículos propulsados por este alcohol.

Por otro lado, algunos análisis sugieren que el mercado mundial de productos derivados del reciclaje de CO_2 logrará capturar apenas una pequeña fracción del CO_2 que liberamos a la atmósfera al quemar combustibles fósiles, que el año pasado ascendió a 36.000 millones de toneladas. La planta de CRI, por ejemplo, convertirá el equivalente a poco más de 2 minutos de emisiones globales de CO_2. Reduciendo esas emisiones «podemos conseguir mucho más, y por

Reutilización del dióxido de carbono

Las empresas están convirtiendo este gas de efecto invernadero en distintos productos. Algunos retienen el CO_2 durante décadas, mientras que otros solo constituyen soluciones temporales, por lo que el gas se incorpora rápidamente a la atmósfera.



* Algunos cultivos pueden convertirse en combustibles.

† La conversión química del CO_2 en combustibles o materias primas a menudo requiere el uso de hidrógeno (H_2), que proviene de gases residuales industriales o de la electrólisis del agua.

FUENTE: «LIMITS TO PARIS COMPATIBILITY OF CO_2 CAPTURE AND UTILIZATION», POR KIANE DE KLEIJNE ET AL. EN *ONE EARTH*, VOL. 5, PÁGS. 168-185, FEBRERO DE 2022; *NATURE* (*gráfico*)

mucho menos dinero, que transformando el CO_2 en otros productos», apunta Niall Mac Dowell, ingeniero de sistemas energéticos del Colegio Imperial de Londres.

«La noción de que podemos solucionar el problema del cambio climático de una forma fácil y rentable es, en el mejor de los casos, ingenua y, en el peor, deliberadamente engañosa», afirma. Es un debate que se va acalorando a medida que se generaliza el reciclaje de CO_2.

Producto con recargo

El empleo de CO_2 como materia prima no es una idea nueva. Cada año se consumen en distintos procesos unos 200 millones de toneladas del gas, la mayor parte de las cuales se hacen reaccionar con amoníaco para producir urea, que se emplea como fertilizante. (La producción de amoníaco también emite CO_2, y el carbono de la urea se libera enseguida tras esparcirla por los campos de cultivo, así que los beneficios climáticos son nulos.) Asimismo, la industria petrolera inyecta CO_2 en el subsuelo para facilitar la extracción de crudo, pero el uso de ese petróleo puede generar más gas del que se almacena.

La verdadera novedad reside en el elevado número de empresas que están llevando al mercado nuevos métodos de reciclaje de CO_2, mientras pregonan los beneficios ambientales de sus iniciativas. Las propuestas van desde el

aprovechamiento de procesos biológicos hasta el uso de catalizadores o celdas electroquímicas.

Muchas de esas compañías emplean catalizadores que permiten combinar el CO_2 con hidrógeno para generar combustibles y productos químicos básicos. Sus principales costes están relacionados con la energía necesaria para obtener el hidrógeno, atrapar el CO_2 y romper los fuertes enlaces carbono-oxígeno del gas a fin de crear nuevas moléculas. Por ello, muchas plantas se ubican en zonas donde existen abundantes flujos de CO_2 residual de gran pureza, así como fuentes de hidrógeno y calor (que impulsan la producción de metanol en Tongyezhen) o electricidad renovable de bajo coste.

Por ejemplo, la primera planta de conversión de CO_2 en metanol de CRI, abierta en 2012 en Islandia, se encuentra al lado de una central geotérmica. Los pozos de la central extraen agua caliente y vapor, que contiene CO_2 no deseado. La planta de CRI aprovecha la red eléctrica islandesa, relativamente «hipocarbónica», para generar hidrógeno «verde» a partir de la hidrólisis del agua. A continuación, los gases se combinan, se calientan, se presurizan y se hacen pasar por un catalizador que facilita la ruptura de los enlaces carbono-oxígeno. De este modo, la planta islandesa recicla cada año 5500 toneladas de CO_2.

«No cabe duda de que sale más caro que producir metanol de la manera habitual», admite Emeric Sarron, director de tecnología de CRI, aunque rehúsa dar cifras. «Pero las empresas que necesitan abastecerse de combustibles renovables están dispuestas a pagar un recargo.» Y la compañía cuenta con clientes: además de las instalaciones de Tongyezhen, CRI construirá otras plantas de gran tamaño en la provincia china de Jiangsu y en el norte de Noruega. Otros proyectos conjuntos en los que participan empresas de Bélgica, Suecia y Dinamarca, y que pretenden iniciar las operaciones entre 2023 y 2025, transformarán CO_2 en metanol que se usará como materia prima y como combustible para barcos.

Combustibles electroquímicos

En vez de crear proyectos tan grandes y centralizados, algunas empresas emergentes consideran que resultará más barato y eficiente convertir el CO_2 en celdas electroquímicas modulares más pequeñas. La californiana Twelve, por ejemplo, confía en que a finales de año dispondrá de un sistema de electrólisis del tamaño de un contenedor marítimo que procesará más de una tonelada de CO_2 al día para generar gas de síntesis, o «sintegás». Este es una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno muy utilizada en la obtención de diversos productos químicos, entre ellos combustibles. Twelve tiene previsto ofrecer la conversión de CO_2 como un servicio para aquellas empresas que deseen disminuir sus emisiones: cobraría por tonelada convertida y vendería los productos finales para cubrir costes. En julio de 2021, recaudó 57 millones de dólares de capital riesgo. «Creemos que somos una pieza clave en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero», asegura Etosha Cave, cofundadora y directora científica de la compañía.

El gas de síntesis suele obtenerse mediante un proceso de alto consumo energético en el que se mezclan metano y agua a altas temperaturas y presiones. En cambio, Twelve emplea un electrolizador comercial modificado que descompone el agua en hidrógeno y oxígeno. La adición de un catalizador metálico a uno de los electrodos del dispositivo (el cátodo) permite convertir de forma simultánea el CO_2 en CO, de modo que el sistema produce gas de síntesis a temperatura ambiente. Twelve se propone usar fuentes renovables de electricidad para alimentar sus unidades de reciclaje.

En el ámbito académico, los químicos han impulsado el desarrollo del reciclaje electroquímico al lograr notables mejoras en los catalizadores catódicos. La eficiencia de Faraday, un parámetro clave que describe la proporción de electrones que se destinan a generar CO en lugar de otros subproductos no deseados, ya supera el 90 por ciento en algunos casos. Y también se está avanzando en otro frente: aumentar la capacidad de los catalizadores para soportar altas densidades de corriente eléctrica, lo que permite que el electrodo transforme más moléculas de CO_2 por unidad de área. Sin embargo, muchos catalizadores comienzan a degradarse tras unos pocos cientos de horas, señala Jan Vaes, director del programa de química sostenible del Instituto Flamenco de Investigación Tecnológica, situado en las cercanías de Amberes.

Los expertos en electroquímica no se centran exclusivamente en el gas de síntesis. Avantium, una empresa de química renovable de Ámsterdam, emplea catalizadores mejorados para obtener ácido fórmico, un compuesto que puede


CARBON RECYCLING INTERNATIONAL

Parte de una planta química de Tongyezhen que reciclará unas 160.000 toneladas de CO_2 al año para obtener combustible.

transformarse en productos químicos más valiosos. En la actualidad, la compañía está probando un reactor electroquímico en una central eléctrica de combustibles fósiles de Alemania.

Y algunos químicos esperan obtener moléculas de carbono más complejas, que podrían venderse a precios más elevados. Generar moléculas más grandes puede resultar problemático (un mayor número de enlaces supone una mayor probabilidad de que los electrones se transfieran a productos secundarios, lo que reduce la eficiencia), pero se están realizando progresos. Por ejemplo, Edward Sargent, ingeniero eléctrico y científico de materiales de la Universidad de Toronto, y su equipo han presentado este año un sistema electroquímico que forma óxido de etileno (un compuesto de uso común en la fabricación de polímeros) a partir de CO_2 y agua. Su catalizador llevó a cabo la conversión con una eficiencia de Faraday sin precedentes, del 35 por ciento.

El debate sobre el ciclo de vida

Todavía se desconoce si los productos reciclados generados a partir de las emisiones industriales de CO_2 protegen realmente el clima, puesto que el gas capturado terminará en la atmósfera si las moléculas se queman o se descomponen. La extracción directa de CO_2 de la atmósfera podría tener beneficios climáticos más evidentes, pero el proceso de captura resulta muy costoso, al igual que la obtención de productos mediante este método.

Los partidarios de transformar el CO_2 industrial en compuestos químicos sostienen que esa estrategia también reduciría las emisiones de otro modo: evitando parte de la fabricación basada en combustibles fósiles. «Al aprovechar los flujos de CO_2 existentes, nuestro método contribuye a mantener los combustibles fósiles en el subsuelo», afirma un portavoz de Twelve.

La manera más rigurosa de evaluar el impacto ambiental consiste en realizar un análisis del ciclo de vida (ACV), un cálculo detallado del carbono asociado a la fabricación y el uso de un producto determinado, desde el origen de su CO_2 hasta su destino último. Muchas empresas de reciclaje de CO_2 aseguran haberse sometido a auditorías de este tipo, pero no publican los resultados porque contienen información confidencial.

Una de las compañías que ha dado a conocer sus ACV es LanzaTech, cuyas oficinas centrales se encuentran en Illinois. La empresa emplea biorreactores basados en bacterias *Clostridium autoethanogenum* para obtener etanol mediante la fermentación de emisiones industriales de CO_2,

CO e hidrógeno. Su directora ejecutiva, Jennifer Holmgren, señala que este tipo de bioconversión resulta más eficaz que los procesos químicos a la hora de tratar flujos de gases residuales heterogéneos, como los procedentes de los gasificadores de residuos urbanos. La empresa posee un reactor en una acería del Grupo Shougang situada cerca de Tianjin, en China, que produce etanol desde 2018. Una segunda planta comenzó a operar el año pasado en una siderúrgica china, y se espera que a finales de año entren en funcionamiento otras plantas comerciales en Bélgica y la India.

El 8 de marzo, LanzaTech anunció su salida a bolsa por 1800 millones de dólares. Además, la compañía afirma que, gracias a una serie de modificaciones genéticas, sus bacterias podrían producir moléculas de mayor tamaño, como acetona e isopropanol. La forma usual de fabricar esos compuestos genera ingentes emisiones de CO_2, pero el ACV de LanzaTech indica que su proceso tiene un balance de carbono negativo, es decir, consume más de lo que emite. No obstante, el análisis no contempla lo que ocurriría con el CO_2 al usar los productos.

Holmgren considera que, en cualquier caso, los productos derivados del CO_2 mitigarán las emisiones al sustituir a los obtenidos por métodos ordinarios. Pero admite que es difícil garantizar que eso vaya a ocurrir: los productos basados en la conversión de CO_2 podrían acabar sumándose al creciente consumo mundial de combustibles y otras sustancias en vez de suplir la fabricación tradicional. Además, no es fácil apreciar indicios directos de este reemplazamiento en un mercado tan incipiente, destaca Sarron.

«El problema con la idea del reemplazamiento es que se esgrime pensando que el mercado se ocupará de ello, en algún lugar del mundo», subraya Andrea Ramírez Ramírez, que investiga técnicas y sistemas hipocarbónicos en la Universidad de Tecnología de Delft. «Pero ¿cómo lo verificamos? Es dificilísimo.»

Una mayor disponibilidad de productos derivados del CO_2 aparentemente inocuos también podría conducir a un mayor consumo de esos recursos, advierte Ramírez Ramírez. Por ejemplo, alguien que procura limitar sus vuelos internacionales quizá decida viajar más si su compañía aérea presume de emplear un carburante respetuoso con el clima. Y señala que ese «efecto rebote» se ha observado al aplicar otras medidas de eficiencia energética, aunque no se ha estudiado en el caso de los productos basados en el CO_2.

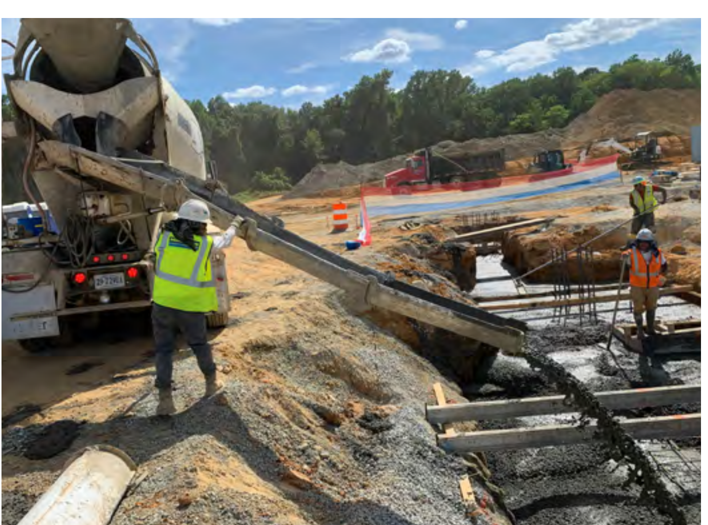
En su opinión, las emisiones negativas, como las anunciadas por LanzaTech, «deberían implicar una eliminación real de CO_2 atmosférico que se pudiera medir físicamente».

Confinamiento de carbono

A fin de obtener el máximo beneficio climático, parecería más lógico encerrar el CO_2 reciclado en productos que perduren varias décadas. Y es ahí donde intervienen los polímeros. «Con ellos se fabrican artículos como espumas aislantes, colchones o cortinas, que poseen una vida útil bastante larga», explica Charlotte Williams, química en la Universidad de Oxford.

Williams desarrolla catalizadores capaces de introducir CO_2 en polioles, alcoholes que se emplean para fabricar espumas de poliuretano. Por lo general, los polioles se obtienen a partir de unos costosos compuestos químicos conocidos como epóxidos, pero los catalizadores de Williams permiten sustituir algunos de ellos por moléculas de CO_2 en la cadena polimérica. Así se atrapa el CO_2 y se reduce el consumo de epóxidos, que también presentan una elevada huella de carbono.

Williams ha fundado una empresa derivada, Econic Technologies, que en septiembre de 2021 firmó un acuerdo para construir una planta piloto



CARBONCURE TECHNOLOGIES

El dióxido de carbono puede inyectarse en el hormigón, donde permanece almacenado durante años.

en la India y acondicionar una instalación existente con el objetivo de incorporar CO_2 residual a polioles. Otras compañías ya están preparando polímeros de un modo similar.

A pesar de todos esos avances, las predicciones apuntan a que la estrategia de los polímeros solo confinaría entre 10 y 50 millones de toneladas de CO_2 al año para 2050. Entonces, ¿merece realmente la pena? «Creo que es una manera errónea de enfocar el problema», opina Williams. «Debemos reducir al máximo las emisiones de CO_2 en todos los ámbitos, pero también invertir en técnicas que puedan usarlo de forma directa.»

Los materiales de construcción, como el hormigón, representan la mejor opción para confinar el CO_2 en productos, apunta Runeel Daliah, analista principal de Lux Research. Se trata de una técnica probada y escalable que ayudaría a satisfacer la enorme demanda mundial de hormigón, por lo que podría llegar a dominar el mercado de la conversión de CO_2. «El hormigón es el único material que permite el secuestro permanente del dióxido de carbono», asegura Daliah.

La mayoría de los productos derivados del CO_2 aún son más caros que sus competidores habituales

Una de las empresas líderes del sector es la canadiense CarbonCure. Fundada en 2012, inyecta CO_2 residual en hormigón fresco para formar nanopartículas de carbonato de calcio. Eso aumenta la resistencia a la compresión del hormigón, por lo que se necesita menos cemento. Dado que la mayor parte de las emisiones de carbono asociadas al hormigón se originan durante la fabricación del cemento, la compañía asegura que la técnica reduciría en un 5 por ciento (o 6 kilogramos de CO_2) la huella de carbono de cada tonelada de hormigón.

La empresa ha instalado más de 550 unidades de inyección de CO_2 en fábricas de hormigón de todo el mundo (sobre todo en Norteamérica), que hasta ahora han secuestrado y mineralizado 150.000 toneladas de emisiones de CO_2. Y según Jennifer Wagner, presidenta de CarbonCure, «eso no es más que la punta del iceberg», ya que en el planeta hay unas 100.000 plantas que producen cerca de 33.000 millones de toneladas de hormigón al año.

Ramírez Ramírez opina que la conversión de CO_2 en sustancias minerales reporta ventajas climáticas mucho más claras que su transformación en combustible. «El análisis del ciclo de vida muestra que los beneficios son mucho mayores y, en mi opinión, mucho más sólidos.»

Incentivos a la retirada de carbono

Por lo que se refiere a la obtención de combustibles y otras sustancias, actualmente la mayoría de los derivados del CO_2 son más caros que sus competidores habituales, señala Josh Schaidle, investigador del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE.UU. que dirigió un análisis de 11 productos obtenidos por conversión de CO_2. Aun así, puede que esos artículos resulten rentables si se fabrican con electricidad renovable de bajo coste y se benefician de las exenciones fiscales, subvenciones y cuotas destinadas a reducir la dependencia mundial de los recursos fósiles [*véase* «El precio de contaminar», por Gilbert E. Metcalf; Investigación y Ciencia, agosto de 2020].

En la Unión Europea, por ejemplo, se ha propuesto un ambicioso paquete de incentivos enmarcado en el Pacto Verde Europeo, con el objetivo de que el bloque alcance la neutralidad climática en 2050. Una ley aún pendiente de aprobación establece cuotas con respecto al uso de carburantes derivados del CO_2 en aviación. Las medidas también incluyen rebajas fiscales para ese tipo de combustibles, y la promesa de una importante inversión en innovación a fin de facilitar que las técnicas salgan al mercado.

En Estados Unidos, algunas empresas afirman que el crédito fiscal conocido como 45Q contribuye a fomentar la conversión de CO_2. Las industrias reciben 50 dólares por cada tonelada de CO_2 que almacenan de forma permanente en el subsuelo, o 35 dólares si aprovechan el gas. En China, aún no ha habido demasiada actividad comercial ligada al desarrollo de técnicas de conversión de CO_2. Sin embargo, en 2021, los principales actores de la gigantesca industria química china se comprometieron a invertir en la producción de compuestos basados en CO_2,

una medida por la que podrían recibir apoyo financiero a través de su mercado nacional de comercio de carbono, que comenzó a operar el año pasado.

Pero el éxito comercial de la conversión de CO_2 podría depender de los ACV y otras mediciones de los flujos de carbono. La Comisión Europea está desarrollando un mecanismo de certificación de la eliminación de carbono, que establecerá un marco riguroso para verificar si un proceso realmente conlleva emisiones negativas.

Por el momento, los ACV ofrecen evaluaciones desfavorables de gran parte de las estrategias de conversión de CO_2. En un estudio publicado en febrero, Kiane de Kleijne, científica ambiental de la Universidad Radboud de Nimega, y sus colaboradores revisaron decenas de ACV para comparar las vías de conversión de CO_2 con los métodos habituales empleados en la fabricación de los mismos productos. Los investigadores también cotejaron el ahorro de CO_2 de los procesos de reciclaje con los objetivos del Acuerdo de París de 2015, que buscan reducir a la mitad las emisiones globales de gases de efecto invernadero para 2030 y alcanzar cero emisiones netas en 2050. «Descubrimos que muy pocas de esas vías son compatibles con los compromisos de París», señala de Kleijne. Las técnicas que cumplieron ese criterio almacenan el CO_2 de forma permanente, por ejemplo, mezclando el gas con escoria de acerías para fabricar ladrillos de hormigón.

A menudo, los climatólogos que realizan ACV señalan que el almacenamiento geológico del CO_2 es más eficaz que la conversión, puesto que conlleva una reducción mucho mayor de las emisiones [*véase* «Las rocas de carbono de Omán», por Douglas Fox; Investigación y Ciencia, septiembre de 2021]. Tal vez sea cierto, pero esos científicos obvian una incontestable realidad económica, matiza Sarron. «Devolver el carbono al subsuelo resulta caro y no se lleva a cabo a una escala significativa. La alternativa a las técnicas actuales no es el almacenamiento, sino la emisión a la atmósfera.»

Y si la economía mundial consigue poner fin a su dependencia del carbón, el petróleo y el gas, puede que las industrias del futuro deban recurrir a esos procesos de conversión de CO_2 para fabricar polímeros y otros productos químicos que necesitamos.

De Kleijne añade que, con demasiada frecuencia, los académicos que realizan ACV y las empresas que desarrollan sistemas de transformación del CO_2 acaban manteniendo un diálogo de sordos.

No obstante, hay al menos una cuestión que suscita un amplio consenso: las técnicas de reciclaje de CO_2 deberían extraer tanto gas como sea posible de la atmósfera, en vez de obtenerlo de los flujos industriales residuales. El proyecto Norsk e-Fuel, desarrollado en Oslo, da un paso en esa dirección gracias al diseño de una planta piloto en Herøya, Noruega, cuyo objetivo es convertir gas de síntesis en carburantes de aviación. Parte del CO_2 se capturará directamente del aire mediante una técnica diseñada por Climeworks, una empresa que nació en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich en 2009.

Esa técnica ya se ha puesto en práctica en la primera planta de captura directa a gran escala de Climeworks, inaugurada en septiembre de 2021 en Hellisheiði, Islandia. Las instalaciones retirarán 4000 toneladas de CO_2 atmosférico al año y las inyectarán en el subsuelo. Secuestrar una tonelada de CO_2 con este método no es nada barato (cuesta entre 600 y 800 dólares), pero la empresa asegura que podrá reducir el coste a una décima parte a medida que se amplíe el proyecto.

Aunque hoy en día la transformación de las emisiones de CO_2 en productos reporte unos beneficios climáticos limitados, algunas empresas defienden la importancia de desarrollar técnicas que estén preparadas para convertir el CO_2 atmosférico una vez que se perfeccionen los métodos de captura directa. «Creo que es un argumento válido», reconoce Ramírez Ramírez. «Pero hemos de asegurarnos de que forma parte de una transición, donde acabemos sustituyendo el carbono fósil por fuentes sostenibles.»

Mark Peplow es periodista científico y doctor en química organometálica.



Con la colaboración de nature

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group© 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una solución integral al carbono. Steven L. Bryant en *IyC*, enero de 2014.
La falacia de la captura de carbono. David Biello en *IyC*, marzo de 2016.
El último recurso. Richard Conniff en *IyC*, septiembre de 2019.
La encrucijada de la biomasa. Eric Toensmeier y Dennis Garrity en *IyC*, octubre de 2020.

CUANDO LO SOSTENIBLE SE TORNA INSOSTENIBLE

Decisiones localmente acertadas pueden resultar ecológicamente desastrosas si se aplican a escalas mayores

Jaime Martínez Valderrama

«Al despertar Gregorio Samsa una mañana, tras un sueño intranquilo, se encontró en su cama convertido en un monstruoso insecto.» Así comienza *La metamorfosis*, de Franz Kafka. Sin embargo, bajo la atenta mirada de un ingeniero de estructuras, el argumento cae por su propio peso. Literalmente. Es físicamente imposible agrandar un organismo y al mismo tiempo mantener sus proporciones. La explicación radica en que los volúmenes, superficies y longitudes están sometidos a la ley de escala. Así, al duplicar el lado de un cubo (L), no obtenemos otro cubo que ocupe el doble, sino uno ocho veces más voluminoso (V') que el original ($V= L{\cdot}L{\cdot}L = L^3$; $V'= 2L{\cdot}2L{\cdot}2L = 8L^3$; $V'=8V$). Es decir, que un saltamontes de tamaño humano colapsaría bajo su peso, puesto que la sección de las patas que deberían sostenerlo no sería suficientemente amplia como para aguantar un volumen que habría crecido en mayor medida al aumentar de tamaño. Alíviense: no pueden existir los insectos gigantes, al menos con la apariencia en que los conocemos.

Este no es un fenómeno desconocido para los diseñadores de infraestructuras o artilugios (Leonardo Da Vinci observó que, para aumentar el tamaño de una máquina y mantener su funcionalidad, era necesario cambiar las proporciones). Tampoco para los biólogos, que han visto que en los seres vivos se produce una variación no proporcional de las dimensiones corporales (alometría). Sin embargo, en otros muchos ámbitos, como el de la planificación territorial, este «factor de escala» parece desconocido. El error más común consiste en pensar que algo que funciona a una determinada escala funcionará igual de bien si se propaga por todo el territorio sin cortapisa alguna. Veamos algunos ejemplos y sus consecuencias.

Es indudable que la agricultura de regadío permite alcanzar una productividad muy superior a la del secano. Más importante, si cabe, es la fiabilidad de las cosechas. ¿Significa ello que lo mejor sería convertir toda la superficie de secano en regadío? No, no es una buena idea. Por un lado, los recursos hídricos disponibles, sobre todo en zonas áridas, no podrían colmar esa demanda de agua. Cuando el regadío supera determinados umbrales aparecen los problemas de escasez, como ocurre en buena parte del Mediterráneo o California e, incluso, se llega al «fallo hídrico», como ha sucedido en Irán al agotar tanto sus recursos superficiales como subterráneos. Por otro lado, ese supuesto enriquecimiento, ligado a unos mayores rendimientos, se evapora, pues la oferta masiva de determinados productos hace que los precios se desplomen y las deudas se disparen.

Ni siquiera en los proyectos que persiguen metas sostenibles, las cosas suelen salir bien cuando se aumenta la escala, sin más. Las crisis energética y climática han disparado las iniciativas que promueven las energías limpias, esas que no emiten CO_2. La instalación de paneles solares parece una buena solución; ocupan espacios en apariencia improductivos que, de la noche a la mañana, se convierten en rentables


ISTOCK: MARIUSZSZCZYGIEL

Planta de paneles solares en Alemania.

productores de energía. Sin embargo, colmar el territorio de huertos solares implica degradar el paisaje que imprimía carácter al lugar, poniendo en juego, como ocurre en el valle de Tabernas, el atractivo turístico de la zona. Este tipo de proyectos pueden funcionar muy bien a una determinada escala, pero a otra mayor pueden tener efectos negativos en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas, al recalentar aún más el medio.

La reforestación puede conllevar, paradójicamente, efectos más devastadores que sanadores. Promover actuaciones que recuperen la cubierta vegetal tiene, sin duda, efectos positivos, como el control de la erosión, el incremento de la biodiversidad, la fijación de carbono o la retención de humedad. Sin embargo, proyectos de este tipo a gran escala pueden empeorar el balance hídrico regional, como ha ocurrido en la meseta de Loes, en el noreste de China, dadas las enormes necesidades hídricas que requiere poner en pie un bosque. Así, algo que localmente ayuda a combatir la desertificación, a gran escala puede generar un problema de desertificación.

Al sumar decisiones atomizadas, que de forma aislada llevan a modificaciones poco sustanciales del medio, nos encontramos con impactos de calado regional. Si, además, añadimos la picaresca, que busca eludir evaluaciones ambientales al no alcanzar la superficie mínima que señalan las leyes, nos encontramos con paisajes desfigurados y efectos contrarios a los deseados. Para reconducir esta situación es necesario utilizar una escala de trabajo equivalente a la de los impactos de esas intervenciones. Este instrumento corresponde a la «planificación territorial integrada», que debe ser conducida desde administraciones cuyo ámbito territorial englobe esta miríada de pequeñas intervenciones que resultan en grandes cambios y cuyo impacto agregado suele exceder la suma de las partes.

La centralización de esas decisiones no puede obviar el conocimiento local y las necesidades propias de cada lugar. Se trata de un reto mayúsculo, incorporado en la meta 15 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: «Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo». Ello implica que hay que computar la degradación y la regeneración derivadas de las diversas actuaciones que concurren en un territorio, de modo que el balance sea neutro (decimos entonces que se logra la neutralidad). Ello debe llevarse a cabo a través de la planificación territorial ya existente (planes de regadío, hidrológicos o de desarrollo). El objetivo es unificar las políticas del uso del suelo, para evitar los efectos inesperados del factor de escala y acercarnos a la ansiada sostenibilidad.

Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.



JUEGOS MATEMÁTICOS

EL PROBLEMA DEL BAR EL FAROL

¿Qué estrategia deberíamos seguir a la hora de intentar detener un penalti o elegir el carril más rápido en una autopista atascada?

Bartolo Luque

No siempre es posible aplicar un razonamiento deductivo para resolver un problema. Pensemos, por ejemplo, en el lanzamiento de un penalti. Tras estudiar muchos vídeos, el portero sabe que el jugador suele tirar a la izquierda del guardameta. En consecuencia, parece claro que debe anticiparse lanzándose hacia ese lado, ¿verdad? Pero el arquero puede seguir con su argumentación: «El jugador sabe que he visto sus vídeos y, como cree que me lanzaré a la izquierda, tirará a la derecha. Entonces, mejor me lanzo a la derecha. Pero, un momento... Él podría hacer justo este mismo razonamiento de segundo nivel y disparar a la izquierda, así que me lanzaré allí para sorprenderlo. A no ser que sea realmente astuto, discurra a tercer nivel y, adivinando que voy a engañarlo, decida tirar a la derecha...».

El portero se sume así en un razonamiento recursivo sin fin. Observemos que no existe una «solución», porque la decisión que debe tomar el guardameta depende de la del jugador, y viceversa. Entonces, ¿qué estrategia puede seguir cada uno de ellos? Una opción es recurrir al azar: lanzar una moneda al aire y elegir un lado u otro dependiendo de si sale cara o cruz.

El método deductivo hace aguas en muchas situaciones cotidianas semejantes. Y el problema se complica aún más si intervienen múltiples actores, como al cambiar de cola en la caja del supermercado o de carril durante un atasco en la autopista. «Parece que ese carril va más rápido. ¿Me voy allí? Pero si muchos conductores piensan como yo y se cambian, ese carril pasará a ir más lento, mientras que este en el que estoy ahora quedará más descongestionado...» Lo mismo sucede cuando decidimos, por ejemplo, evitar las horas punta al regresar de nuestras vacaciones. No podemos emplear un razonamiento deductivo porque, si todos piensan como nosotros y deciden volver a otra hora, quizá nos veamos envueltos en un atasco monumental... y, a partir de aquí, caemos en el mismo razonamiento recursivo del portero de fútbol.

¿Es la estrategia aleatoria la más conveniente en todos estos casos de interacción entre el individuo y el colectivo? Depende de la situación. En un entorno cambiante, también podemos recurrir al razonamiento inductivo, que conlleva un proceso donde todos los actores van adaptando sus estrategias en función de la observación y la experiencia para acabar alcanzando una solución conjunta eficaz. Sobre esta cuestión, en el marco de los mercados financieros, reflexionaba el economista norirlandés Brian Arthur cuando propuso en 1994 el problema del bar El Farol.

El bar El Farol

El Farol es el nombre de un concurrido bar de Santa Fe, Nuevo México, donde todos los jueves por la noche tocan música irlandesa en vivo. Los N clientes aficionados a este tipo de música deben decidir cada semana, de forma independiente, si acuden o no al concierto. Por desgracia, el local es pequeño y solo caben cómodamente n personas, con $n < N$. Si la asistencia supera ese valor umbral n, la experiencia resulta agobiante. Así pues, cada uno de los N clientes debe tratar de inferir qué es mejor hacer cada semana, ir al bar o no, en función de sus experiencias pasadas. Puntualicemos que no se permite colusión (acuerdos previos) ni comunicación alguna entre



Bar El Farol en Santa Fe, Nuevo México, en una foto de 2010.

los clientes, y que la única información de la que disponen esas N personas es la asistencia de las m últimas semanas. ¿Qué estrategia deberían seguir?

De nuevo nos encontramos frente a un problema para el que no existe una solución deductiva. Los clientes pueden adoptar una infinidad de estrategias en función de la asistencia pasada. Por ejemplo, uno de ellos puede decidir que, si en las últimas m semanas acudir al bar había resultado una buena experiencia, lo mejor es no ir esa semana. Y otro puede optar por la táctica opuesta. Ningún cliente puede elegir su estrategia de forma deductiva, al no saber cuáles escogerán los demás.

¿Qué resultado obtendríamos si nos encomendásemos al azar? Supongamos que el número de clientes del bar es $N = 100$ y el «umbral de comodidad» es de $n = 60$ asistentes. Entonces, lo óptimo para el colectivo sería que cada semana acudieran al local exactamente 60 personas, escogidas al azar de entre las 100 posibles. Así, cada semana tendríamos 60 clientes satisfechos, el máximo que se puede alcanzar. (Un cliente estará satisfecho tanto si acude al bar un día de poca afluencia como si se queda en casa un día de ambiente agobiante. Por tanto, si una semana asisten al concierto 95 personas, solo habrá 5 satisfechas: las que decidieron no ir.)

Si cada cliente toma su decisión al azar, con una probabilidad $p = 0{,}60$ de acudir al concierto y $1 - p = 0{,}40$ de no ir, el modelo se comporta como la distribución binomial de una variable aleatoria que puede tomar valores 0 y 1 con probabilidades $P(0) = 0{,}40$ y $P(1) = 0{,}60$. El valor medio de tal variable sería $Np = 100 \times 0{,}60 = 60$ personas, justo la asistencia óptima. Pero observemos que, en realidad, lo que tendremos es fluctuaciones en torno a ese valor. Cuanto más grandes sean esas fluctuaciones, mayor será el descontento entre la clientela. Si una semana van al bar 95 personas y la siguiente 25 (una fluctuación de 35 clientes por encima de la media y otra de 35 por debajo), la asistencia media de las dos noches será de 60 personas, pero habrá tan solo $(5 + 25)/2 = 15$ clientes satisfechos, en promedio.

En estadística, el tamaño medio de las fluctuaciones se caracteriza mediante la desviación típica, que para una distribución binomial vale $\sqrt{Np(1-p)}$. Cuanto menor sea la deviación típica, más cerca estaremos del valor óptimo para el colectivo. En nuestro caso la desviación típica es de $\sqrt{100 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}4} \approx 5$ personas. Eso significa que, en general, la asistencia estará entre $60 - 5 = 55$ y $60 + 5 = 65$ personas y, en promedio, tendremos $(55 + 35)/2 = 45$ clientes satisfechos.

Pero recordemos que una de las condiciones del problema es que no haya acuerdos previos

entre los clientes. En esas condiciones, es poco verosímil que todos decidan jugar al azar y, además, con las probabilidades óptimas. Más bien nos encontraremos con que cada uno emplea una estrategia diferente. De hecho, si buscamos un resultado colectivo lo más satisfactorio posible, es preciso que las predicciones individuales sean heterogéneas, porque lo contrario podría conducir a la frustración colectiva. Por ejemplo, si los datos de las últimas m semanas hacen que todos los clientes prevean una asistencia masiva, nadie acudirá al concierto, lo que invalidaría el pronóstico y dejaría el bar vacío esa semana.

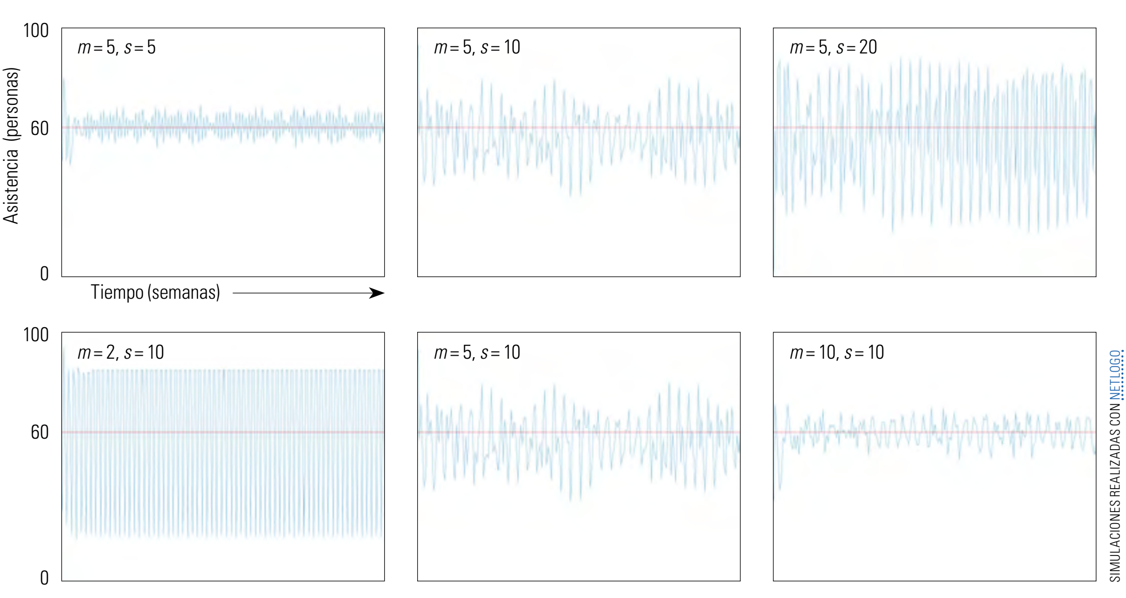
Estrategias y memoria

Arthur simuló el problema asignando a los clientes (o «agentes») de su modelo un determinado número de estrategias o predictores, funciones que tomaban como argumento el historial de asistencia al bar durante las m semanas anteriores y devolvían un 0 (no acudir) o un 1 (acudir). Por ejemplo, una de esas estrategias podría ser calcular la asistencia media en las últimas m semanas e ir al bar solo si es menor que el umbral de comodidad n.

Así pues, fijando el número de agentes N y el umbral de comodidad n, y limitando la información a la asistencia de las últimas m semanas, Arthur proporcionó a cada agente s predictores distintos y los dotó de capacidad inductiva de una manera muy ingeniosa: en cada turno, cada agente usaba el predictor que mejor le hubiera funcionado hasta ese momento. Para adaptar inductivamente sus estrategias, los agentes concedían un punto a los predictores que hubieran acertado en la última ronda, y así actualizaban sus clasificaciones. En la siguiente ronda cada agente escogía el predictor con mayor puntuación para el nuevo historial de m valores, y así sucesivamente. De este modo, los mejores predictores determinaban el número de clientes que acudían al bar y, a su vez, la asistencia iba definiendo los mejores predictores. ¿Cuál era el resultado?

Podemos examinar el problema del bar El Farol por medio del simulador en línea NetLogo. El programa fija $N = 100$ y los deslizadores permiten establecer los valores de los parámetros: el umbral de comodidad n, el tamaño de la memoria m (la cantidad de semanas previas para las que se considera la asistencia, información que conocen todos los clientes) y el número de predictores s que evalúa cada agente. El simulador calcula la asistencia $A(t)$, es decir, el número de clientes que acuden al bar cada semana t, como una serie temporal que se va dibujando en la pantalla.

Si jugamos un poco con los parámetros del modelo, llegaremos a una conclusión sorprendente: como vemos en la figura de abajo, el colectivo se autoorganiza alrededor de una asistencia media de 60 personas (el valor óptimo), sin importar el



Simulaciones del problema del bar El Farol cuando variamos el número de estrategias *s* (*arriba*) y el tamaño de la memoria *m* (*abajo*) para cada agente. En ambos casos, la asistencia fluctúa en torno al valor óptimo, y las fluctuaciones crecen al aumentar *s* y al disminuir *m*.

valor de dichos parámetros. ¿Cómo es posible? Recordemos que los predictores se van adaptando en cada ronda. Como resultado, el sistema siempre alcanza un equilibrio donde, en promedio, el 40 por ciento de los clientes pronostica que la asistencia sobrepasará el umbral de comodidad (y, por consiguiente, no acude al bar), mientras que el 60 por ciento restante prevé que no lo superará (y sí acude), exactamente igual que en el caso aleatorio. Pero ¿qué ocurre con la desviación típica, con las fluctuaciones en torno a esta media?

La parte superior de la figura muestra tres simulaciones para las que hemos usado el mismo tamaño de la memoria ($m = 5$). Podemos apreciar cómo las fluctuaciones aumentan con el número de estrategias o predictores, que en este caso son $s = 5$, 10 y 20.

En la parte inferior de la figura, vemos otras tres simulaciones, donde ahora hemos fijado el número de predictores ($s = 10$) y vamos aumentando el tamaño de la memoria ($m = 2$, 5 y 10). Y resulta que la variabilidad disminuye a medida que tenemos más información sobre la asistencia pasada. Así que, aparentemente, cuanto menor sea el número de estrategias y mayor sea la memoria, menor será la desviación típica.

Aplicaciones económicas

El problema del bar El Farol puede considerarse un modelo muy simplificado del mercado financiero: en cada ronda, los agentes pueden comprar un activo (ir al bar) o venderlo (no ir). Tras cada paso de tiempo, el precio del activo se determina mediante una sencilla regla de oferta y demanda: si hay más vendedores que compradores, el precio bajará y estos últimos estarán de enhorabuena; en cambio, si hay más compradores que vendedores, el precio subirá, y los que saldrán ganando serán los vendedores. En los mercados financieros, el precio es una cantidad que fluctúa como resultado de las interacciones entre los agentes, del mismo modo que la asistencia al bar fluctúa alrededor de la ocupación media n.

En la ortodoxia económica, los modelos deductivos se desarrollan a partir de la «hipótesis del mercado eficiente», según la cual todos los agentes son racionales, disponen de toda la información y tratan siempre de maximizar sus beneficios. Bajo estos supuestos, el sistema alcanza un estado de equilibrio casi al instante, por lo que los economistas suelen afirmar que «los precios reflejan inmediatamente toda la información».

Sin embargo, es obvio que eso dista mucho de la realidad: en esas condiciones, ningún agente lograría lucrarse de forma desmesurada, como de hecho ocurre. Los agentes de los mercados financieros reales no son hiperracionales: presentan una racionalidad limitada o incluso actúan de forma totalmente irracional (pensemos en las situaciones de pánico bursátil), y tampoco tienen todos el mismo acceso a la información.

Siendo así, ¿por qué insisten los economistas en la hipótesis del mercado eficiente? El motivo es que ese supuesto permite desarrollar modelos matemáticos deductivos muy elegantes. La situación recuerda al chiste del borracho que, en una noche cerrada, trata de hallar algo bajo la luz de una farola. Un policía le pregunta qué está buscando y el borracho le responde que unas llaves que se le cayeron 100 metros más allá. Sorprendido, el policía le dice que por qué está mirando entonces bajo la farola, y el borracho le contesta: «Porque aquí es donde hay luz».

Para concluir, recordemos que la desviación típica parecía disminuir al reducir el número de estrategias y al aumentar la memoria. ¿Existe algún conjunto de parámetros que consiga «vencer» al azar, es decir, que produzca una desviación típica menor que 5 en nuestro ejemplo? Aunque la respuesta es afirmativa, la forma en que Arthur planteó los predictores impide explorar todas las posibilidades con un ordenador. Curiosamente, la generalización matemática del problema del bar El Farol, que en principio debería ser más difícil de tratar, permitió obtener una solución completa y nuevos resultados inesperados. En nuestra siguiente columna, veremos cómo los físicos que investigan sistemas complejos formularon esa generalización a través del «juego de minoría», el modelo paradigmático de la incipiente disciplina bautizada como econofísica.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

Inductive reasoning and bounded rationality. W. Brian Arthur en *American Economic Review*, vol. 84, págs. 406-411, mayo de 1994.

Network-based phase space analysis of the El Farol Bar problem. Shane St. Luce y Hiroki Sayama en *Artificial Life*, vol. 27, págs. 113-130, noviembre de 2021.

Minority games: Interacting agents in financial markets. Damien Challet, Matteo Marsili y Yi-Cheng Zhang. Oxford University Press, 2014.

UN GENIO ADICTO AL PENSAMIENTO

Un recorrido por los campos del saber a los que contribuyó el polímata John von Neumann



The man from the future: The visionary life of John von Neumann
Ananyo Bhattacharya
Penguin, 2021
368 páginas

La historia de la ciencia es, en gran medida, una historia de especialización. Aunque la revolución científica introdujo metodologías específicas (como la matematización y el experimento) para el estudio de los fenómenos naturales, estos siguieron formando parte de los intereses generales del filósofo hasta el siglo XVIII. Así, mientras inauguraba la filosofía moderna con la duda metódica, Descartes también enunciaba el principio de inercia, formulaba la geometría analítica y postulaba un universo lleno de una sustancia cuyos vórtices mantenían a los planetas girando alrededor del Sol. Sin embargo, la filosofía natural se iría desgajando poco a poco de la filosofía para dar lugar a la física, mientras que los matemáticos acabarían singularizándose por una actividad cada vez más independiente de posibles aplicaciones a otras ramas del conocimiento.

La tendencia a la especialización que propició el nacimiento de las distintas ciencias naturales y las matemáticas como disciplinas autónomas operó también dentro de cada una de ellas. En sus *Notas autobiográficas*, Albert Einstein relata cómo, siendo estudiante en la Escuela Federal Politécnica de Zúrich, descuidó las matemáticas al ver que «estaban divididas en tantos campos especializados que cada uno de ellos podría consumir el corto tiempo de vida que nos es concedido». Y eso lo colocaba «en una situación parecida a la del asno de Buridán, que no puede decidirse por un montón de heno en particular». Su percepción de la física no era muy diferente, aunque en este caso aprendió pronto a concentrarse en las cuestiones realmente fundamentales.

El siglo XX aceleraría de manera extraordinaria la especialización que Einstein percibió tan claramente ya en sus albores. Es por ello por lo que, si la figura del polímata resulta fascinante en sí misma, lo es mucho más cuando surge en nuestra «era de las demarcaciones», como la ha denominado el historiador cultural Peter Burke. En *The man from the future: The visionary life of John von Neumann*, Ananyo Bhattacharya nos acerca a la figura de uno de estos polímatas contemporáneos, el matemático John von Neumann (1903-1957), un gigante intelectual que dejó una profunda impronta en matemáticas, física, computación, economía, e incluso en la geoestrategia de la Guerra Fría. El lector no debe esperar, sin embargo, una biografía al uso, centrada en las peripecias vitales o los logros científicos del protagonista. Como deja entrever su subtítulo, el libro es tanto un viaje por la vida y obra de Von Neumann como también —si no principalmente— un recorrido por aquellos campos del saber que ayudó a moldear.

Von Neumann perteneció a una prodigiosa constelación de científicos húngaros que eclosionó en la primera mitad del siglo XX y que incluye a Theodore von Kármán, Leó Szilárd, Edward Teller o Eugene Wigner. Nacidos en Budapest y formados en esa ciudad y más tarde en Alemania, las turbulencias políticas y sociales de la Europa de entreguerras los acabarían llevando a Estados Unidos. Así, tras haber iniciado su carrera académica en las universidades de

Berlín y Hamburgo, Von Neumann se instaló en 1930 en Princeton, primero como profesor invitado de la Universidad y, desde 1933, como miembro permanente del recién creado Instituto de Estudios Avanzados.

Bhattacharya traza la vida de Von Neumann sobre el trasfondo de algunos grandes temas que fueron cautivando su atención en distintos períodos de su vida. Uno de ellos son las matemáticas puras, comenzando con la axiomatización de la teoría de conjuntos (sobre la que realizó su tesis doctoral) y continuando con la que probablemente es su mayor contribución al campo: el estudio de los anillos de operadores que hoy conocemos como álgebras de Von Neumann, así como la clasificación de un tipo particular de estas álgebras, los llamados factores.

El interés de Von Neumann por esas estructuras tiene su origen en la física y en la búsqueda de un fundamento matemático riguroso para la recién formulada mecánica cuántica. Pero su trabajo trascendió la cuestión crucial de articular un formalismo matemático para la teoría y dotarla de una estructura lógica, ya que en el proceso abordó y definió problemas centrales, como el de la medida de los observables. Tal y como nos muestra el libro, las ideas de Von Neumann determinaron el desarrollo posterior de la teoría cuántica, en especial en lo referente a los aspectos interpretativos.

Tras la entrada de Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial, Von Neumann no dudó en poner su talento al servicio del bando aliado, primero en el Laboratorio de Investigación Balística (BRL) y, más tarde, en el Proyecto Manhattan. La experiencia con explosivos de carga hueca que adquirió en el BRL fue clave para resolver el problema de cómo comprimir una esfera de plutonio en una masa crítica lo bastante rápido para evitar la predetonación. Las lentes de implosión que se construyeron a partir del diseño de Von Neumann se usarían en la prueba nuclear Trinity y en la bomba Fat Man, lanzada sobre Nagasaki.

La participación de Von Neumann en el programa nuclear norteamericano continuó tras el final de la guerra. El científico contribuyó tanto al diseño de nuevas armas —fue uno de los principales impulsores del desarrollo de la bomba de hidrógeno— como a la definición de la estrategia nuclear estadounidense, a través de su trabajo en la Corporación RAND y en la Comisión de Energía Atómica. En realidad, ambas actividades guardan una estrecha relación con otros dos de los temas clave que se tratan en el libro. Uno es la construcción de los primeros ordenadores digitales, consecuencia directa de la participación de Von Neumann en el diseño de la bomba de hidrógeno. Y es que dicha empresa requería una potencia de cálculo muy superior a la que se podía obtener con calculadoras mecánicas similares a las empleadas en el Proyecto Manhattan.

El segundo tema es la teoría de juegos, sobre la que Von Neumann había publicado en 1928 el que hoy se considera su artículo fundacional. Aunque, en años posteriores, la colaboración con Oskar Morgenstern le llevaría a centrarse en las aplicaciones a la economía, la Guerra Fría pondría de manifiesto la utilidad de la teoría de juegos en el análisis de cuestiones geoestratégicas. El libro describe de forma magistral las ideas de Von Neumann en este campo, tanto en su vertiente científica como en la política. También detalla las contribuciones de los miembros de la escuela surgida en torno a la Corporación RAND, que liderarían durante décadas el desarrollo de esa rama de las matemáticas aplicadas.

La parte final del libro está dedicada a una extensa presentación de los sistemas autorreplicantes no biológicos, tema que captó buena parte de la atención de Von Neumann en sus últimos años de vida. Como en otros pasajes, la narración se proyecta hacia el futuro, dando cuenta de desarrollos posteriores como el juego de la vida de John Horton Conway o el «nuevo tipo de ciencia» basada en los autómatas celulares que propuso Stephen Wolfram en los primeros años del presente siglo.

Además de una gran biografía, *The man from the future* es un sobresaliente trabajo de divulgación, un repaso a todo un abanico de temas asociados con el nombre de Von Neumann y que han permanecido como campos de investigación activos hasta el día de hoy. Bhattacharya nos ha obsequiado con un libro accesible y muy informativo donde el lector, a la vez que aprende sobre ciencia, tiene la oportunidad de asomarse a la personalidad y la mente únicas de uno de los grandes genios del siglo xx: el hombre que, en palabras del matemático Peter Lax, era «adicto a pensar».

Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca